

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
***CAMPUS* DIADEMA**

Douglas da Silva Tanajura

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO DRASTIC NA ESTIMATIVA DA
VULNERABILIDADE INTRÍNSECA DAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS NO SISTEMA JACARÉ-TIETÊ/SP**

DIADEMA

2018

Douglas da Silva Tanajura

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO DRASTIC NA ESTIMATIVA DA
VULNERABILIDADE INTRÍNSECA DAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS NO SISTEMA JACARÉ-TIETÊ/SP**

Dissertação apresentada, como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Análise Ambiental Integrada, ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu do Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas da Universidade Federal de São Paulo – *Campus* Diadema.

Orientador: Prof. Dr. Claudio B. B. Leite

DIADEMA

2018

Tanajura, Douglas da Silva

Avaliação do Método DRASTIC na estimativa da vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas no Sistema Tietê-Jacaré/SP/ Douglas da Silva Tanajura. - - Diadema, 2018.

84 f.

Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas – Universidade Federal de São Paulo – Campus Diadema, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Benedito Baptista Leite

1. Vulnerabilidade. 2. Águas subterrâneas. 3. Sistema Jacaré-Pepira. 4. DRASTIC. 5. Aquíferos. I. Título.

CDD 551.49

Dedico,

Aos meus pais Mario e Gilvania por todo o suporte e motivação, pelos incontáveis esforços e pelo amor incondicional. Tudo o que de bom possa acontecer em minha vida devo a vocês.

Com todo meu coração, à minha noiva Julia. Um anjo que a vida me deu a oportunidade de amar. Agradeço seu apoio incondicional, sua paciência em me ouvir e me acompanhar e sua compreensão pelos momentos de ausência.

Aos meus amigos por todo o apoio e companheirismo nesses anos todos, vocês são poucos, mas seu valor é inestimável. Também agradeço aos familiares que têm me acompanhado e motivado a seguir meu caminho.

Em memória de Maike e Mila que infelizmente se foram no ano de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Claudio Benedito Baptista Leite por tantos ensinamentos, tantas experiências compartilhadas e por ser essencial na realização do sonho de concluir o mestrado. Agradeço por confiar em mim na realização deste trabalho e por considerar minhas observações na construção e execução do projeto. Agradeço pelas conversas que certamente levarei por toda a minha vida.

Agradeço à colega Suellen de Melo Vieira, por compartilhar esta jornada comigo e pela ajuda em diversos momentos. Obrigado pela amizade, parceria e pela ajuda mútua nas tarefas que participamos juntos.

Agradeço aos professores e colegas da turma de 2016 do Programa de Pós-Graduação em Análise Ambiental Integrada. Obrigado pelos ensinamentos, pelas trocas de experiências e pela harmoniosa convivência mesmo em momentos de dificuldade na Universidade. Desejo muito sucesso a todos.

Agradeço à CAPES pela bolsa de mestrado durante todo o período do curso.

“Tu te tornas eternamente responsável por aquilo que cativas”

O Pequeno Príncipe

TANAJURA, D. S. Avaliação do Método DRASTIC na estimativa da vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas no Sistema Jacaré-Tietê/SP. Dissertação (Mestrado). Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas. Universidade Federal de São Paulo. Diadema. 2018.

RESUMO

A água é o recurso natural mais precioso do planeta Terra. Compreender a dinâmica das águas subterrâneas resultou em avanços socioeconômicos e novas perspectivas para as populações nativas de regiões anteriormente inóspitas. No sentido inverso do processo de melhora da qualidade de vida, é crescente a presença de atividades antrópicas com consumo exacerbado de água e com alto potencial poluidor. As diversas dificuldades encontradas em cenários de contaminação cada vez mais complexos mostraram que o controle preventivo de uso e cobertura do solo é indispensável para a gestão dos recursos hídricos em áreas mais vulneráveis. Na tentativa de atender este desafio, devido à sua importância na literatura científica e sua aplicação em estudos no mundo todo, definiu-se o DRASTIC como o método mais adequado para avaliação da vulnerabilidade intrínseca à contaminação das águas subterrâneas na área do Sistema Jacaré-Tietê. Os mapeamentos da vulnerabilidade permitiram a observação de problemas sistemáticos na estrutura do método DRASTIC, sobretudo concernentes à baixa sensibilidade dos parâmetros Recarga e Condutividade Hidráulica na escala deste trabalho, mantendo-se constantes em toda a área de estudo. Diante disto, foram propostas modificações na abordagem dos parâmetros Recarga e Condutividade Hidráulica, e novas classes de vulnerabilidade objetivando a priorização de áreas mais suscetíveis à contaminação. No arcabouço das modificações propostas, o parâmetro Recarga passou a ser delimitado pelos limites espaciais das formações geológicas, e o parâmetro Condutividade Hidráulica foi substituído pelo parâmetro Cobertura do Solo, de modo a aprimorar significativamente sua sensibilidade espacial na obtenção e mapeamento da vulnerabilidade. Os resultados obtidos mostraram que as modificações realizadas influenciaram na variação espacial dos sete parâmetros DRASTIC, fazendo com que todos apresentassem sensibilidade adequada à escala de trabalho do DRASTIC e às heterogeneidades da área de estudo, aproximando-se, indubitavelmente, das condições reais encontradas na área do Sistema Jacaré-Tietê. Portanto, este trabalho alcançou os objetivos propostos e trouxe contribuições significativas para as discussões concernentes às modificações no método DRASTIC para avaliação da vulnerabilidade intrínseca à contaminação das águas subterrâneas. Por fim, recomenda-se que métodos de estimativa da vulnerabilidade, selecionados conforme diferentes necessidades, sejam utilizados pelo poder público como ferramenta para regramento do zoneamento de uso e cobertura do solo objetivando a proteção dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Vulnerabilidade. Águas subterrâneas. Sistema Jacaré-Tietê.

DRASTIC. Aquíferos.

TANAJURA, D. S. Assessment of the DRASTIC method in estimating the intrinsic vulnerability of groundwater in the Jacaré-Tietê System/SP. Dissertation (Master of Sciences). Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas. Universidade Federal de São Paulo. Diadema. 2018.

ABSTRACT

Water is the most precious natural resource on Earth planet. Understanding the hydric dynamics of groundwater has resulted in socioeconomic advances and new perspectives for the native populations of previously inhospitable regions. In the opposite direction of the improvement process of the life quality, it's increasing the presence of anthropic activities with exacerbated consumption of water and with high polluting potential. The various difficulties found in increasingly complex contamination scenarios shown that preventive control of soil and land use is indispensable for the management of water resources in more vulnerable areas. In an attempt to meet this challenge, due to its importance in the scientific literature and its application in studies worldwide, the DRASTIC was defined as the method for assessing the groundwater intrinsic vulnerability in the area of the Jacaré-Tietê System. The vulnerability mapping allowed the observation of systematic problems in the structure of the DRASTIC method, mainly the low sensitivity of the parameters Recharge and Hydraulic Conductivity in the scale of this work, keeping constant all over the study area. In view of this, were proposed modifications in the approach of the parameters Recharge and Hydraulic Conductivity, and new classes of vulnerability aiming the prioritization of more susceptible areas to contamination. In the framework of the proposed modifications, the Recharge parameter has modified to be delimited by the spatial limits of the geologic formations, and the Hydraulic Conductivity parameter was replaced by the Soil Coverage parameter, in order to significantly improve its spatial sensitivity in obtaining and mapping the vulnerability. The obtained results shown the made modifications influenced the spatial variation of the seven DRASTIC parameters, bringing all of them to present adequate sensitivity to the DRASTIC work scale and the heterogeneities of the study area, approaching, undoubtedly, the real conditions found in the area of the Jacaré-Tietê System. Therefore, this work met the proposed objectives and brought significant contributions to the discussions concerning the changes in the DRASTIC method to assess the groundwater intrinsic vulnerability. Finally, it's recommended that vulnerability estimation methods, selected according to their suitability to the different needs, be applied by the public authorities as tools for the zoning rules for soil land use and land cover aiming the water resources protection.

Key-words: Vulnerability. Groundwater. Jacaré-Tietê System. DRASTIC. Aquifers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Exemplos de potenciais fontes de contaminação de aquíferos.....	17
Figura 2. Localização da área de estudo	29
Figura 3. Mapa de solos da área de estudo	31
Figura 4. Geologia da área de estudo	33
Figura 5. Fluxograma das atividades executadas	35
Figura 6. Representação gráfica dos parâmetros DRASTIC.....	36
Figura 7. Mapa do parâmetro D – Profundidade no nível d’água.....	49
Figura 8. Mapa do parâmetro R – Recarga do aquífero livre	50
Figura 9. Mapa do parâmetro A – Material do aquífero.....	51
Figura 10. Mapa do parâmetro S – Tipos de solo	52
Figura 11. Mapa do parâmetro T – Topografia (declividade)	53
Figura 12. Mapa do parâmetro I – Influência da zona vadosa	54
Figura 13. Mapa do parâmetro C – Condutividade Hidráulica.....	55
Figura 14. Mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas do SJT – DRASTIC Padrão.....	60
Figura 15. Mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas do SJT – DRASTIC Pesticidas.....	61
Figura 16. Mapa do parâmetro R Modificado – Recarga relativa a cada unidade litológica na área de estudo	69
Figura 17. Mapa do parâmetro Cobertura do Solo	70
Figura 18. Mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas do SJT – DRASTIC Padrão Modificado	71
Figura 19. Mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas do SJT – DRASTIC Pesticidas Modificado.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Pesos (p) dos parâmetros DRASTIC.....	37
Tabela 2. Valores dos índices do parâmetro D.....	38
Tabela 3. Valores dos índices do parâmetro R.....	38
Tabela 4. Valores dos índices do parâmetro A.	39
Tabela 5. Valores dos índices do parâmetro S.....	40
Tabela 6. Valores dos índices do parâmetro T.	40
Tabela 7. Valores dos índices do parâmetro I.	41
Tabela 8. Valores dos índices do parâmetro C.....	42
Tabela 9. Classes de vulnerabilidade – DRASTIC.	44
Tabela 10. Classes de vulnerabilidade - DRASTIC Modificado.....	45
Tabela 11. Classes, índices e pesos por parâmetro na área do SJT.	47
Tabela 12. Recarga calculada das sub-bacias no SJT.....	57
Tabela 13. Condutividades hidráulicas nas formações geológicas do SJT.	58
Tabela 14. Recarga das formações geológicas e índices do parâmetro R.....	66
Tabela 15. Índices do parâmetro Cobertura do Solo	67
Tabela 16. Variação das classes de vulnerabilidade.....	74

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	OBJETIVO GERAL.....	15
2.1.	Objetivos Específicos	15
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1.	Problema ambiental a ser estudado	16
3.2.	O conceito de vulnerabilidade	18
3.3.	A escolha do método de estimativa da vulnerabilidade.....	22
4.	ÁREA DE ESTUDO	28
4.1.	Aspectos Gerais	28
4.2.	Pedologia Local.....	30
4.3.	Geomorfologia e Geologia.....	32
5.	MÉTODO DE TRABALHO.....	35
5.1.	Procedimentos metodológicos adotados.....	35
5.2.	O método DRASTIC.....	36
5.2.1.	Parâmetros do método DRASTIC.....	37
5.2.2.	Obtenção dos parâmetros DRASTIC.....	42
5.2.3.	Classes de vulnerabilidade DRASTIC	44
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
6.1.	Tratamento dos Dados.....	46
6.2.	Mapas de vulnerabilidade DRASTIC	59
6.3.	Modificações nos parâmetros DRASTIC	68
7.	CONCLUSÕES.....	76
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1. INTRODUÇÃO

A água é o recurso natural mais precioso do planeta Terra. Avanços científicos e tecnológicos permitiram à sociedade humana estimar e compreender que 98% da água doce potável mundial estão armazenados em aquíferos (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB, 2014a), embora este volume não esteja integralmente disponível ao consumo. Não obstante à sua importância, a pressão antrópica sobre águas subterrâneas para abastecimento humano, agrícola e industrial nas últimas décadas tem sido crescente no Brasil e no mundo.

Antes pouco conhecida, a compreensão da dinâmica hídrica de aquíferos trouxe avanços socioeconômicos e novas perspectivas para as populações nativas de regiões anteriormente inóspitas. Entretanto, atividades antrópicas diversas em larga escala como agricultura, instalação de empreendimentos com alto potencial poluidor e o aumento exponencial do consumo de água, resultaram em impactos ambientais em diferentes escalas e níveis de complexidade no mundo todo.

Em diversos locais, a extração extensiva e intensiva de água subterrânea superou o poder de recarga dos aquíferos, sendo esta a principal causa para um balanço hídrico deficitário, que tem por consequência o esgotamento de aquíferos anteriormente produtivos e o aumento do potencial de contaminação das águas subterrâneas.

Há ainda uma complexidade associada à percepção ambiental destes eventos. A ocorrência de contaminação das águas subterrâneas é comumente imperceptível pelas comunidades locais, pois como este processo se situa em ambiente subterrâneo fazendo com que os cuidados de saúde pública sejam negligenciados, sendo comuns os casos onde a contaminação só é detectada quando as comunidades locais apresentam sintomas característicos.

Frente às diversas dificuldades encontradas nestes cenários, o controle prévio à instalação de atividades potencialmente poluidoras mostra-se indispensável para efetiva gestão dos recursos hídricos em áreas mais suscetíveis à contaminação ambiental (AL HALLAQ e ELAISH, 2012). Além disso, é comum que projetos de remediação ambiental revelem que a prática de estratégias corretivas está fortemente associada a custos ambientais e econômicos exorbitantes, enquanto

projetos de prevenção à contaminação antrópica mostram-se significativamente mais eficazes, seja do ponto de vista ambiental ou econômico (HAMZA et al., 2015).

Na tentativa de atender o desafio de criar um sistema para prevenir a contaminação dos recursos hídricos, em 1985 a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency - USEPA) publicou a primeira versão do método DRASTIC, que foi criado para ser um modelo de avaliação padronizado da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos. Dois anos depois, em 1987, a USEPA publicou a segunda versão deste documento, onde houve ampliação do aporte de informações e diversos estudos de caso realizados pela Agência em diversas áreas nos Estados Unidos (ALLER et al., 1985, 1987).

Atualmente, a literatura científica indica o método DRASTIC como um dos métodos mais importantes e utilizados para estimativa da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos no mundo. Nos últimos anos, diversos estudos têm sido realizados com ênfase em modificações estruturais no DRASTIC, podendo-se citar os trabalhos de Auge (2004), Civita e Maio (2004), Stigter; Ribeiro e Dill (2006), Antonakos e Lambrakis (2007), Al Hallaq e Elaish (2012), Hamza et al. (2015) e Santos et al. (2015), objetivando aumentar a sensibilidade de cada parâmetro e tornar a ponderação de seus índices menos subjetiva, resultando em melhorias significativas no processo de avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas.

Não obstante ao processo de consolidação e desenvolvimento do método DRASTIC, diversos outros métodos foram criados para atender propósitos variados. Foster (1987) publicou um método para avaliação da vulnerabilidade denominado GOD, desenvolvido no âmbito da Organização Mundial de Saúde, baseando-se em apenas três parâmetros: G – Ocorrência de água subterrânea; O – Ocorrência de estratos de cobertura; e D – Profundidade do topo do aquífero.

Van Stempvoort, Ewert e Wassenaar (1992) criaram um sistema denominado AVI (Aquifer Vulnerability Index) que se baseia em dois parâmetros: a condutividade hidráulica da zona vadosa e a profundidade do nível d'água subterrânea. Este método obtém a Resistência Hidráulica da área avaliada e resulta no tempo (frequentemente apresentado em anos) que um contaminante hipotético pode levar para migrar entre a superfície do terreno e o topo do aquífero.

Foster et al. (2002) publicaram um método denominado POSH (Pollutant Origin Surcharge Hydraulically), que sistematiza o potencial de cargas de

contaminantes de acordo as atividades antrópicas realizadas em superfície considerando o tipo de uso e cobertura do solo. Auge (2004) propôs outro método, denominado EKV, que resulta da associação de dois parâmetros – Espessura (E) e permeabilidade vertical da zona vadosa (Kv) — e objetiva especificamente a avaliação de aquíferos livres.

Para este trabalho, dentre os métodos mais utilizados atualmente – DRASTIC, AVI e GOD – optou-se pelo método DRASTIC como o mais adequado para a avaliação da vulnerabilidade intrínseca na área delimitada pelas sub-bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Pepira e Jacaré-Guaçú, denominada como Sistema Jacaré-Tietê (RABELO, 2006).

O método DRASTIC e demais métodos supracitados têm como principal produto a estimativa da vulnerabilidade de aquíferos enquanto ferramenta para gestão sustentável dos recursos hídricos. Com isso, espera-se que estudos nesta temática sejam utilizados como subsídio técnico-científico para direcionamento de esforços institucionais, legais, econômicos e políticos para proteção e monitoramento de áreas prioritárias (PARALTA; FRANCES; RIBEIRO, 2005).

O Sistema Jacaré-Tietê foi definido como área de estudo por conta de sua relevância em relação aos recursos hídricos no estado de São Paulo, que é evidenciada por diversos fatores, tais como a presença significativa do Sistema Aquífero Guarani (SAG) em seus domínios territoriais, as conexões hidráulicas laterais entre as duas sub-bacias (CORRÊA, 1995) e pela grande diversidade de atividades antrópicas em sua área, subdividindo-se em urbana, agrícola e industrial (RABELO, 2006).

Portanto, será realizada a estimativa da vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas na área do Sistema Jacaré-Tietê (SJT) tendo como referência o método DRASTIC (ALLER et al., 1985; 1987). Considerando os diversos estudos com alterações estruturais no DRASTIC, este trabalho também apresenta proposições de modificações no sistema de avaliação da vulnerabilidade do método DRASTIC, especificamente modificações que resultaram no aumento da sensibilidade dos parâmetros Recarga e Condutividade Hidráulica à variação espacial da vulnerabilidade e na proposição de novas classes de vulnerabilidade com vistas à priorização de áreas mais suscetíveis à contaminação.

2. OBJETIVO GERAL

Considerando-se a relevância do tema abordado e as contribuições que o presente trabalho almeja produzir, definiu-se enquanto objetivo geral:

- Estimar a vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas na área do Sistema Jacaré-Tietê e propor modificações em alguns parâmetros do método DRASTIC (ALLER et al., 1987);

2.1. Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral proposto para este trabalho seja alcançado, foram identificados os seguintes objetivos específicos:

- Obter e consolidar dados secundários quanto à geologia, potenciometria, pluviosidade, pedologia, topografia e hidrologia do Sistema Jacaré-Tietê;
- Estimar a vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas no Sistema Jacaré-Tietê a partir do método DRASTIC;
- Propor adaptações em alguns parâmetros do método DRASTIC para melhoria de qualidade no mapeamento da vulnerabilidade com base nos levantamentos previamente realizados (DRASTIC Modificado);
- Estimar a vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas no Sistema Jacaré-Tietê a partir da utilização do método DRASTIC Modificado;
- Comparar os resultados dos mapeamentos de vulnerabilidade intrínseca a partir de DRASTIC e de DRASTIC Modificado;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se o levantamento bibliográfico que fomentou e subsidiou, do ponto de vista técnico e científico, a realização deste trabalho. Inicialmente foi abordada a problemática ambiental que envolve a estimativa da vulnerabilidade, onde objetiva-se situar o presente trabalho na temática ambiental. Em seguida são descritos os processos históricos de discussões da comunidade científica acerca do conceito de vulnerabilidade. Por fim, procede-se às justificativas do processo de escolha do método que foi utilizado, sendo apresentada a fundamentação teórica que subsidiou a definição pelo método DRASTIC.

3.1. Problema ambiental a ser estudado

Aproximadamente 98% do volume total de água do planeta Terra é salgada e ocupa o equivalente a dois terços da superfície terrestre. Excluída a água congelada nos polos, apenas 0,6% da água doce está tecnicamente disponível para uso, subdividindo-se em 2% de águas superficiais (rios e lagos) e 98% de águas subterrâneas (CETESB, 2014a).

A partir da década de 1970, observou-se aumento significativo do consumo de água no Brasil e os aquíferos tornaram-se fontes cada vez mais importantes para este uso (HIRATA, 1994; CORRÊA, 1995; CETESB, 2014a). Atualmente, em decorrência deste processo, somente no estado de São Paulo são abastecidos por água subterrânea 5,5 milhões de habitantes, em aproximadamente 80% dos municípios paulistas (CHRISTOFIDIS, 2003; CETESB, 2014a).

Nas últimas décadas, o sistema de abastecimento público tradicional, que se utiliza de água proveniente de reservatórios superficiais, teve sua eficiência e importância reduzidas (SHRESTHA; SEMKUYU; PANDEY, 2016). A captação de água subterrânea surge como uma alternativa para substituir este processo e garantir o atendimento à demanda de água, sobretudo devido à sua qualidade natural e ao baixo custo operacional para sua captação e tratamento (CETESB, 2014b).

As águas subterrâneas são importantes, principalmente, por sua função primordial no abastecimento público. Como consequência, a pressão antrópica sobre estes recursos tem aumentado mais rapidamente do que a execução de ações

públicas para proteção do ambiente e de controle da instalação de empreendimentos e atividades potencialmente contaminantes (CETESB, 2014a).

Diversas fontes, pontuais e difusas, podem originar a contaminação do meio ambiente subterrâneo e, por conseguinte, das águas subterrâneas (Figura 1) (FOSTER et al., 2006; ALBUQUERQUE FILHO et al., 2012). A urbanização e a agricultura são fontes difusas tipicamente associadas à poluição hídrica, visto que ocupam extensas áreas e os contaminantes lixiviados destas atividades podem atingir os aquíferos (HIRATA, 1994; TUCCI et al., 2000; LIMA, 2001). Fontes de contaminação pontuais são definidas por sua localização em pontos específicos, como tanques de armazenamento de combustível e indústrias (LIBOS, 2003).

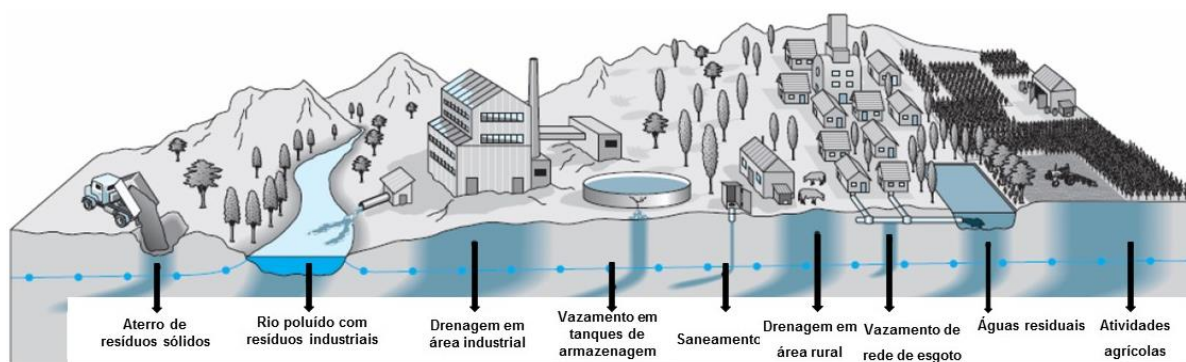


Figura 1. Exemplos de potenciais fontes de contaminação de aquíferos.

Fonte: Foster et al., 2006.

Atualmente, o agronegócio é um dos principais setores da economia brasileira, composto principalmente por monoculturas de cana-de-açúcar, milho, soja e laranja no estado de São Paulo (TUNDISI et al., 2008; Instituto de Economia Agrícola - IEA, 2017). A aplicação intensiva e extensiva de pesticidas é rotineira na agricultura, pois é sua função eliminar ou agredir os organismos vivos indesejáveis, denominados de pragas (SABIK; JEANNOT; RONDEAU, 2000; TUNDISI et al., 2008, USEPA, 2016). Entretanto, de todo pesticida utilizado apenas 0,1% atinge os organismos de interesse, enquanto 99,9% ficam disponíveis para o meio natural (SABIK; JEANNOT; RONDEAU, 2000). Lourencetti et al. (2006) apontaram que o principal destino final do volume de pesticidas não absorvido pelas plantas são os recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

É importante também considerar a dificuldade de percepção ambiental relacionada às contaminações de aquíferos. As atividades antrópicas realizadas em superfície, sejam pontuais ou difusas, resultam em cenários de perigo de contaminação do meio natural subterrâneo, sendo bastante comum que a

contaminação de águas subterrâneas seja detectada pelo poder público apenas quando ocorrem alterações sintomáticas na saúde da população local (SILVA; ARAUJO, 2003; USEPA, 2016).

Destaca-se que, na tentativa de proteger os aquíferos de eventos de contaminação, o estudo da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos objetiva indicar os principais locais alvos para atuação de programas de prevenção ambiental. Diante disto, espera-se que trabalhos com foco na estimativa da vulnerabilidade sejam utilizados como norteadores na criação e no cumprimento das regulamentações e políticas públicas de uso e cobertura do solo.

3.2. O conceito de vulnerabilidade

O conceito de vulnerabilidade do meio ambiente subterrâneo aparece inicialmente em trabalhos publicados no final da década de 1960. Com base no conhecimento científico da época, acreditava-se que havia uma proteção natural à contaminação das águas subterrâneas, provida essencialmente pela composição de solos e rochas entre a zona subsuperficial saturada e a superfície terrestre (ALLER, 1987; ERTEL; LÖBLER; SILVA, 2012).

Esta concepção foi contraposta em um estudo realizado por LeGrand (1964), que identificou traços de substâncias poluentes na água oriundas de atividades locais em diversos locais. Com isso, iniciou-se a discussão acerca da possível suscetibilidade dos aquíferos à contaminação como resultado de sua exposição a empreendimentos potencialmente poluidores (SILVA; ARAUJO 2003; MENEZES et al., 2014).

Os primeiros trabalhos que abordaram o conceito de vulnerabilidade foram realizados na França e nos Estados Unidos, notadamente por LeGrand (1964, 1965, 1970) e Margat (1968). Uma contribuição notável destes trabalhos foi a criação do termo “*aquifer pollution vulnerability*” (vulnerabilidade à poluição do aquífero) por Margat (1968) em um dos artigos que iniciaram as discussões na temática da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação. Nestas primeiras publicações, a vulnerabilidade era definida como a estimativa da possibilidade de difusão de potenciais contaminantes entre a superfície terrestre e o topo do aquífero.

Com o interesse da comunidade científica pelo tema, diversos estudos também foram realizados em outros lugares. Em 1970, Albinet e Margat publicaram

na França um artigo a respeito da cartografia de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação, que consolidou, ainda que de modo rudimentar, o conceito de “cartografia de vulnerabilidade”. Nos anos seguintes, novos trabalhos foram realizados, como: Taltasse (1972) no Brasil, Aller et al. (1985, 1987) nos Estados Unidos, Bachmat e Collin (1987) na Holanda, Foster e Hirata (1988) no Peru, Civita et al. (1990) na Itália, Chachadi e Lobo-Ferreira (2001) na Índia, Departamento de Águas e Energia (DAEE), Instituto Geológico (IG/SMA); Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT/SP) e Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (2005) no Brasil, Stigter, Ribeiro e Dill (2006) em Portugal, e Leite et al. (2011), Santos et al. (2015) e Oliveira et al. (2017) no Brasil.

Neste processo, diversos autores expuseram abordagens e definições divergentes quanto à definição do conceito de vulnerabilidade para além do conceito de vulnerabilidade à poluição do aquífero apresentado por Margat (1968). Kayane (1983), em trabalho que tratou da problemática a respeito do balanço hídrico de águas subterrâneas, definiu um aquífero como vulnerável quando explorado enquanto fonte de abastecimento de água, pois nesta situação os casos de superexploração eram bastante comuns.

Bachmat e Collin (1987), Aller et al. (1987) e Foster (1987) publicaram trabalhos que defenderam que o estudo da vulnerabilidade como uma propriedade intrínseca do meio físico seria o modo mais viável de compreender as interações no processo de contaminação de aquíferos. Esta afirmação se deve à avaliação de que estimar a vulnerabilidade específica dos principais grupos de contaminantes demandaria, por definição, a observação de seu comportamento em todo o aquífero, o que seria oneroso, complexo e de difícil operacionalização.

Foster (1987) trouxe uma definição com caráter técnico-científico, em que a vulnerabilidade pode ser determinada pela conjunção entre as configurações estruturais do meio físico e a presença de propriedades que possam atenuar a contaminação dos aquíferos locais.

Em contraponto, para Andersen e Gosk (1989), em trabalho inserido na temática da elaboração de mapas de vulnerabilidade, a obtenção da definição precisa da vulnerabilidade dependeria do mapeamento das características dos contaminantes especificamente estudados.

Lobo-Ferreira e Cabral (1991) definiram a vulnerabilidade como risco de poluição, que depende não só da vulnerabilidade intrínseca, mas também da existência de cargas poluentes significativas que possam atingir o ambiente subterrâneo.

A realização de diversos estudos resultou em discussões amplas em diversos países a respeito da vulnerabilidade. Para atender esta demanda, eventos internacionais foram realizados e resultaram na definição do conceito de vulnerabilidade, apresentado na síntese mundialmente utilizada publicada por Vrba e Zoporozec (1994) enquanto:

Uma propriedade intrínseca do sistema de águas subterrâneas que depende da sensibilidade do sistema frente aos impactos humanos e/ou naturais, também denominada vulnerabilidade intrínseca.

A adição do termo 'intrínseca' ao conceito de vulnerabilidade permitiu aos cientistas visualizarem uma nova abordagem nos trabalhos subsequentes, em que a vulnerabilidade pudesse ser tratada com uma propriedade natural do meio físico, estritamente relacionada com as configurações hidrogeológicas resultantes de processos naturais de litogênese e pedogênese em cada local estudado.

Considerando esta síntese, autores como Paralta, Frances e Ribeiro (2005), Fijani et al. (2013), Foster, Hirata e Andreo (2013) e Menezes et al. (2014) consideraram aquíferos vulneráveis como aqueles que possuem propriedades hidrogeológicas pouco favoráveis à atenuação natural de contaminantes no caminho entre a superfície do terreno e o lençol freático, ou seja, sua configuração morfo-granulométrica tende a ter baixa retenção física dos contaminantes e os processos de degradação não são suficientes.

Para além da discussão acerca do conceito de vulnerabilidade, diversos trabalhos foram realizados para estabelecer se este conceito deveria fazer referência unicamente à configuração natural do meio físico ou às características específicas dos diferentes grupos de contaminantes.

A partir da definição do conceito de vulnerabilidade trazida por Vrba e Zoporozec (1994), Lobo-Ferreira (1998) tratou da temática da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas como tema central em um estudo para gestão das águas subterrâneas em Portugal. Neste trabalho, foi discutida a importância em

reconhecer que a vulnerabilidade de um aquífero depende também do tipo de poluente potencial específico, isto é, a água subterrânea pode ser muito vulnerável a uma carga de nitratos, originada por práticas agropecuárias incorretas, e, no entanto, ser pouco vulnerável a cargas patogênicas devido à degradação natural destes agentes.

Com esta abordagem, definiu-se que a avaliação da vulnerabilidade do meio aquífero em situações singulares (como nutrientes, compostos orgânicos, solventes, metais pesados e outros) seria entendida como estudo da vulnerabilidade específica (LEITE et al., 2011). O mapeamento da vulnerabilidade específica então permitiria contemplar separadamente diferentes grupos de atividades potencialmente poluentes, como indústrias (FOSTER, 1987), aterros sanitários (LEGRAND, 1983), produção agrícola (CANTER, 1987) e outros, considerando as propriedades de cada contaminante e sua interação com o sistema aquífero.

Auge (2004), em trabalho revisional sobre a vulnerabilidade de aquíferos, considerou a definição de vulnerabilidade intrínseca apresentada por Vrba e Zoporozec (1994) e a abordagem de vulnerabilidade específica apresentada Lobo-Ferreira (1998) para sintetizar esta discussão em uma resolução simples: a vulnerabilidade intrínseca trata da suscetibilidade natural do meio físico que constitui o aquífero, e a vulnerabilidade específica aborda o risco de contaminação frente à presença de diferentes categorias de cargas contaminantes.

A partir de então, estas definições passaram a ser amplamente utilizadas no mundo todo, tornando-se referências básicas em trabalhos nesta temática em que há necessidade de diferenciação entre as definições de vulnerabilidade. A realização de estudos para casos específicos, levando-se em conta a vulnerabilidade específica do meio, seguiram sendo realizados até os dias atuais. Isso se deve à sua grande importância científica, subsidiando trabalhos em diversos locais considerando-se diferentes grupos de contaminantes, onde se pode citar os trabalhos clássicos de: Foster (1987); Canter (1987); Lobo-Ferreira (1998); Civita e Maio (2004); Pereira Júnior; Soares e de Castro (2015); Santos et al. (2015); Shrestha; Semkuyu e Pandey (2016) e Soares, Faria e Rosa (2017).

O presente trabalho, entretanto, tem como proposta a estimativa regional da vulnerabilidade, sem dedicar-se a grupos de contaminantes específicos, mas sim direcionando esforços no sentido de estimar a vulnerabilidade intrínseca das águas

subterrâneas inseridas na área de estudo. Neste contexto, será considerado o conceito de vulnerabilidade intrínseca sintetizado por Vrba e Zoporozec (1994), sobretudo por sua relevância sendo utilizado em diversos trabalhos de grande importância, como pode-se destacar: Auge (2004), Foster; Hirata e Andreo (2013), Hamza et al. (2015), Santos et al. (2015) e Oliveira et al. (2017).

3.3. A escolha do método de estimativa da vulnerabilidade

Até o início da década de 1960, a camada de solos e rochas situada acima da zona saturada dos aquíferos era entendida como a estrutura natural que garantiria a proteção das águas subterrâneas (ERTEL; LÖBLER; SILVA, 2012).

Margat (1968), em um trabalho sobre a vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação, fez uma abordagem transformadora da dinâmica hídrica de contaminantes no meio ambiente subterrâneo, definindo a vulnerabilidade das águas subterrâneas como o resultado do potencial de atenuação natural do ambiente frente a eventos de contaminação.

A vulnerabilidade passa então a ser entendida como um parâmetro adimensional, relativo e imensurável do meio físico, indicativo das áreas com maior probabilidade de contaminação ambiental e reflete o grau de influência dos processos de atenuação natural de contaminantes no percurso entre fonte superficial de contaminação e o aquífero (ALLER, 1987; STIGTER; RIBEIRO; DILL, 2006).

Assim como diversas contribuições para obtenção da definição deste conceito foram – e continuam a ser – apresentadas, a criação de métodos e técnicas para representação gráfica e numérica da vulnerabilidade também seguiu sendo amplamente desenvolvida, principalmente devido à necessidade de sua aplicação na gestão de recursos hídricos no escopo de ação de políticas públicas (ALLER et al., 1985; 1987; OLIVEIRA; MOINANTE; LOBO-FERREIRA, 1997; AUGE, 2004).

A principal dificuldade no cálculo da vulnerabilidade é a impossibilidade de realizar sua estimativa em campo, utilizando-se, por exemplo, uma ferramenta ou instrumento de medição. Na obtenção dos dados dos parâmetros que podem influenciar a vulnerabilidade em uma determinada área, um fator limitante que se apresenta é a ausência de controle adequado, em diversos países, das informações

levantadas nos estudos ambientais realizados, sobretudo devido à baixa confiabilidade dos estudos realizados (PARALTA; FRANCES; RIBEIRO, 2005).

A obtenção dos parâmetros necessários à estimativa da vulnerabilidade mostra-se, portanto, uma importante limitação de ordem técnica neste tipo de estudo. Os primeiros registros de publicações científicas que trataram da influência direta dos parâmetros do meio físico na hidrodinâmica do meio ambiente subterrâneo são do final da década de 1950.

Em um estudo sobre métodos para computação do potencial de evapotranspiração no balanço de água, Thornthwaite e Mather (1957) propuseram o tabelamento e ponderação da infiltração de água na superfície do terreno para estimativa do balanço de água e da evapotranspiração. Anos mais tarde, Fenn et al. (1975), considerando a infiltração de água no solo como um fenômeno atuante na hidrodinâmica local, descreveram métodos de balanço de água para avaliação da lixiviação em aterros de resíduos sólidos.

Os estudos realizados entre as décadas de 1950 e 1970 concentraram esforços na quantificação de diferentes parâmetros do meio físico e descrição de suas relações com a dinâmica da água nos solos e rochas. Todo este arcabouço técnico e científico contribuiu para o surgimento de uma nova tendência na década de 1980, onde os trabalhos relacionados ao meio ambiente subterrâneo contribuíram com proposições e comparações metodológicas objetivando padronizar métodos.

Resumindo os métodos selecionados para avaliação do impacto na qualidade das águas subterrâneas, Seller e Canter (1980) utilizaram esquemas de notas, árvores de decisão e listas de critérios na comparação de sete diferentes métodos para estimativa do potencial de poluição da água subterrânea em uma área de descarte de resíduos.

Gibb et al. (1983) propuseram um sistema de ranqueamento para diferentes áreas de deposição de lixo embasado no risco de ingestão de água subterrânea contaminada, considerando-se o risco à saúde, a população em risco, a proximidade de poços e aquíferos e a suscetibilidade de aquíferos definida por uma nota que pode variar de 0 a 100.

O Departamento de Recursos Naturais de Michigan (1983) desenvolveu um método para avaliar o risco relativo que também se utilizou de classificação paramétrica, mas as notas atribuídas podiam variar de 0 a 2000 pontos. Nesta

proposta, o potencial de liberação e o risco químico de contaminantes foram avaliados, bem como a exposição ambiental atual e potencial e a aplicabilidade de metas definidas para garantia do fornecimento de água adequado.

Hutchinson e Hoffman (1983) utilizaram dados da Agência de Pesquisa Geológica de Nova Jersey para desenvolver um sistema de classificação da vulnerabilidade e proteger áreas com maior potencial de poluição da água subterrânea. Neste trabalho, avaliou-se a geologia ponderando-se 11 critérios e diferentes níveis de deposição de lixo considerando-se oito critérios para cada área, resultando-se em uma pontuação variando entre 0 (menos vulnerável) e 100 pontos (mais vulnerável).

LeGrand (1983) publicou um trabalho que propôs um sistema padrão para avaliar os impactos ambientais em áreas de deposição de lixo a partir da classificação da vulnerabilidade de aquíferos, que obteve notável destaque nos Estados Unidos e hoje é uma referência clássica nesta temática. Este sistema viria a ser conhecido com o Sistema de LeGrand, e apresentou como principal diferencial o uso de pesos numéricos para avaliar o potencial de poluição da água subterrânea em áreas de deposição de lixo. Sua proposta consistiu em realizar a avaliação da vulnerabilidade em 4 etapas, associando a descrição hidrogeológica e o potencial natural de atenuação na área, a sensibilidade do aquífero presente, o potencial químico de contaminantes e possíveis alterações de engenharia que poderiam modificar o potencial de contaminação avaliado.

Diante de inúmeras publicações esparsas como, por exemplo, Thornthwaite e Mather (1957), Fenn et al. (1975), Seller e Canter (1980), Gibb et al. (1983), Hutchinson e Hoffman (1983) e LeGrand (1983), a USEPA identificou a necessidade de discutir o desenvolvimento dos sistemas já existentes e criar um índice padrão para estimativa regional da vulnerabilidade. Com isso, tomando o Sistema de LeGrand como referência, publicou em 1985 um documento intitulado “*DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*” (ALLER et al., 1985), que traduzido livremente para o português seria “DRASTIC: um sistema padronizado para avaliar o potencial de poluição das águas subterrâneas usando configurações hidrogeológicas”.

Neste sistema, quantifica-se a vulnerabilidade a partir da somatória ponderada entre sete parâmetros definidos pelo acrônimo DRASTIC, sendo D -

Profundidade do nível d'água (NA), R - Recarga do Aquífero, A - Material do Aquífero, S - Tipo de Solo, T - Topografia, I - Influência da Zona Vadosa e C - Condutividade Hidráulica do Aquífero. Assim, são atribuídos índices à influência de cada parâmetro no processo de atenuação natural durante a migração de um contaminante hipotético entre a superfície do terreno e o lençol freático.

Embora o método DRASTIC tenha sido amplamente aceito e aplicado em diversos estudos subsequentes no mundo todo, outros sistemas foram criados para atender propósitos variados.

Também em 1987, Foster (1987) publicou um método denominado GOD para avaliação da vulnerabilidade utilizando-se da multiplicação entre a ponderação de apenas três parâmetros: G - Grau de confinamento da água subterrânea; O - Ocorrência de estratos de cobertura; e D - Distância entre a superfície do terreno e a zona saturada do aquífero.

Durante a década de 1990, este método foi amplamente empregado em trabalhos no Caribe e na América Latina, sendo ainda um dos mais utilizados no Brasil (OLIVEIRA, 2013). Entretanto, sua utilização foi consideravelmente baixa nos Estados Unidos, Europa e Oriente Médio, pois sua formulação foi considerada simplificada, além de não considerar a recarga nos cálculos (GUIGUER; KOHNKE, 2002), enquanto o DRASTIC, amplamente adotado nestes locais, possui alta adaptabilidade às particularidades da hidrogeologia local de cada área de estudo (LOBO-FERREIRA, 1998).

Outro método de avaliação da vulnerabilidade conhecido como AVI (*Aquifer Vulnerability Index*) foi publicado no Canadá por Van Stempvoort, Ewert e Wassenaar (1992) em parceria com o Instituto Nacional de Pesquisa em Hidrologia objetivando estimar a vulnerabilidade em escala local para empreendimentos específicos. Este método foi criado utilizando-se como base dados comumente disponíveis e operações simples, sendo ponderados apenas dois parâmetros para o cálculo da resistência hidráulica (C): a espessura (d) de cada camada sedimentar da zona saturada do aquífero e a condutividade hidráulica (K) de cada uma dessas camadas sedimentares, tendo, portanto: $C = \sum d_i / K_i$.

Em uma abordagem voltada para o uso e cobertura do solo, Foster et al. (2002) publicaram um método denominado POSH (*Pollutant Origin Surcharge Hydraulically*) que possibilita a ponderação das atividades antrópicas realizadas em

superfície considerando o tipo de atividade, a capacidade de geração de contaminantes e a carga hidráulica local. Diante disso, as áreas são classificadas em três níveis de acordo com seu potencial de contaminação ambiental, podendo ser: reduzida, moderada e alta.

Auge (2004) publicou um novo método para estimativa da vulnerabilidade denominado EKV. Este método foi desenvolvido como um índice para ponderação de dois parâmetros, tendo por objetivo específico a avaliação de aquíferos livres. Obtém-se então a profundidade da superfície freática (E) e a condutividade vertical da zona não saturada (Kv) para aplicação em somatória ponderada e posterior obtenção da vulnerabilidade intrínseca variando entre 1 (muito baixa) até 10 (alta).

Além dos métodos aqui apresentados, há diversos outros que podem ser aplicados a situações específicas, que incluem particularidades hidrogeológicas, topográficas, climáticas e pedológicas, e também propriedades específicas de contaminantes. Os procedimentos metodológicos têm mudado conforme mais estudos, percepções e tecnologias são desenvolvidos (SHRESTHA; SEMKUYU; PANDEY, 2016). Seja qual for o método a ser aplicado, o planejamento preliminar de ações é imprescindível para definição do escopo do projeto de estudo e aplicação de qualquer que seja o método definido.

Nestes trabalhos, o principal objetivo é a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas, que por sua vez deve contemplar a compilação dos dados necessários e resultar em produtos que possam predizer as áreas mais suscetíveis à infiltração de um contaminante hipotético no meio físico. Com isso, espera-se que estudos nesta temática sejam utilizados para direcionamento de esforços para proteção, monitoramento e conservação ambiental, e como subsídio técnico-científico no zoneamento de uso e cobertura do solo (PARALTA; FRANCES; RIBEIRO, 2005).

De acordo com Aller et al. (1987), um sistema eficiente de avaliação da vulnerabilidade deve: atuar como ferramenta de gestão; ser simples e de fácil operação; utilizar informações disponíveis; e ser exequível por pessoas com diversos níveis de conhecimento técnico-científico. Samake et al. (2011) propõem ainda que métodos de vulnerabilidade devem sintetizar e associar os diversos parâmetros do meio físico. Destacam-se então os sistemas de mapeamento da

vulnerabilidade intrínseca de aquíferos propostos por: Albinet e Margat (1970), Haertle (1983), LeGrand (1983), Aller et al. (1987) e Foster (1987).

Diante do exposto, apresenta-se o método DRASTIC (ALLER et al., 1985; 1987) por ser dos métodos mundialmente mais utilizados na avaliação a vulnerabilidade intrínseca de água subterrânea (SAMAKE et al., 2011).

Aplicado por diversos autores em estudos nos Estados Unidos, Europa e Oriente Médio (CARVALHO, 2013), o método DRASTIC (ALLER et al., 1985; 1987) tem fácil aplicação, permite a compilação de um aporte expressivo de informações disponíveis, possibilita sua aplicação em áreas com diferentes características e resulta um mapeamento reconhecido internacionalmente por sua qualidade e representatividade (LIGGETT; ALLEN, 2010, FIJANI et al., 2013).

Na tentativa de seguir uma tendência mundial de estratégias de proteção dos recursos hídricos, e diante da quantidade e qualidade de informações técnicas disponíveis acerca da hidrogeologia do Sistema Jacaré-Tietê, definiu-se o método DRASTIC (ALLER et al., 1985; 1987) como o método mais adequado para atender às premissas e aos objetivos do presente trabalho.

Conforme consolidado na literatura científica, serão utilizados dados secundários extraídos de trabalhos científicos já publicados, utilizando somente fontes absolutamente confiáveis para obtenção dos parâmetros hidrogeológicos quantificáveis do meio físico, a fim de se reduzir significativamente as incertezas associadas ao processo de avaliação da vulnerabilidade intrínseca pelo método DRASTIC (LOBO FERREIRA; CABRAL, 1991; Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, 2002; ANTONAKOS; LAMBRAKIS, 2007).

Esclarece-se que este método será aplicado para estimativa da vulnerabilidade intrínseca do meio físico, não possuindo, deste modo, nenhuma intenção de prever a ocorrência e/ou a concentração de contaminantes, quaisquer que sejam, nas águas subterrâneas, conforme publicado originalmente por Aller et al. (1985; 1987). Para que fosse estabelecido um padrão conceitual, os aquíferos da área estudada foram considerados freáticos livres e as drenagens presentes foram consideradas efluentes, isto é, são recarregadas pelas águas subterrâneas dos aquíferos locais.

4. ÁREA DE ESTUDO

Apresenta-se a seguir a descrição ambiental da área de estudo, incluindo as principais características locais que influenciam na vulnerabilidade, como recarga, geologia, pedologia e topografia.

4.1. Aspectos Gerais

O Sistema Jacaré-Tietê (SJT) situa-se na região central do estado de São Paulo, e localiza-se entre as coordenadas UTM 7606988 mN e 726648 mE, 7507079 mN e 839679 mE, Fuso 22S e meridiano central 51°W. Sua área é delimitada pelas sub-bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Pepira e Jacaré-Guaçú e foi calculada utilizando-se o software ArcGIS® na versão 10.1 (Environmental Systems Research Institute - ESRI, 2012), resultando em 6.339,6 km² de área e 260 km de perímetro, subdivididos em 9 sub-bacias hidrográficas pertencentes ao Sistema (Figura 2).

A área de estudo está inserida no domínio territorial da Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos - UGRHI13 (Tietê-Jacaré), que por sua vez faz fronteira a Sudeste com a UGRHI 10 (Tietê-Sorocaba) e UGRHI 5 (Piracicaba-Capivari-Jundiaí), com a UGRHI 9 (Mogi) a Nordeste, com a UGRHI 16 (Tietê-Batalha) a Noroeste, e a Sudoeste com a UGRHI 17 (Médio Paranapanema) (Comitê de Bacia Hidrográficas Tietê-Jacaré - CBH-TJ, 2016).

O clima local do Sistema Jacaré-Tietê enquadra-se no tipo “Cwa”, que corresponde ao “clima tropical de altitude com chuvas no período de outubro e março, e seca entre abril e setembro” (KÖPPEN, 1948). A temperatura média anual local é igual a 20°C (TUNDISI et al., 2008) e a precipitação média anual para a bacia, calculada a partir do Relatório de Situação dos Recursos Hídricos 2016 é igual a 1379 mm (CBHTJ, 2016).

Do ponto de vista hidrológico, os corpos d'água de menor ordem presentes no sistema são tributários dos rios Jacaré-Guaçú e Jacaré-Pepira, onde se encontra alta densidade de nascentes e, por conseguinte, de afluentes destes rios em toda a área de estudo, o que evidencia sua relevante importância para produção de água em âmbito regional conforme descrito em um levantamento realizado pela Cooperativa de Serviços, Pesquisas Tecnológicas e Industriais (CPTI; IPT, 2008).

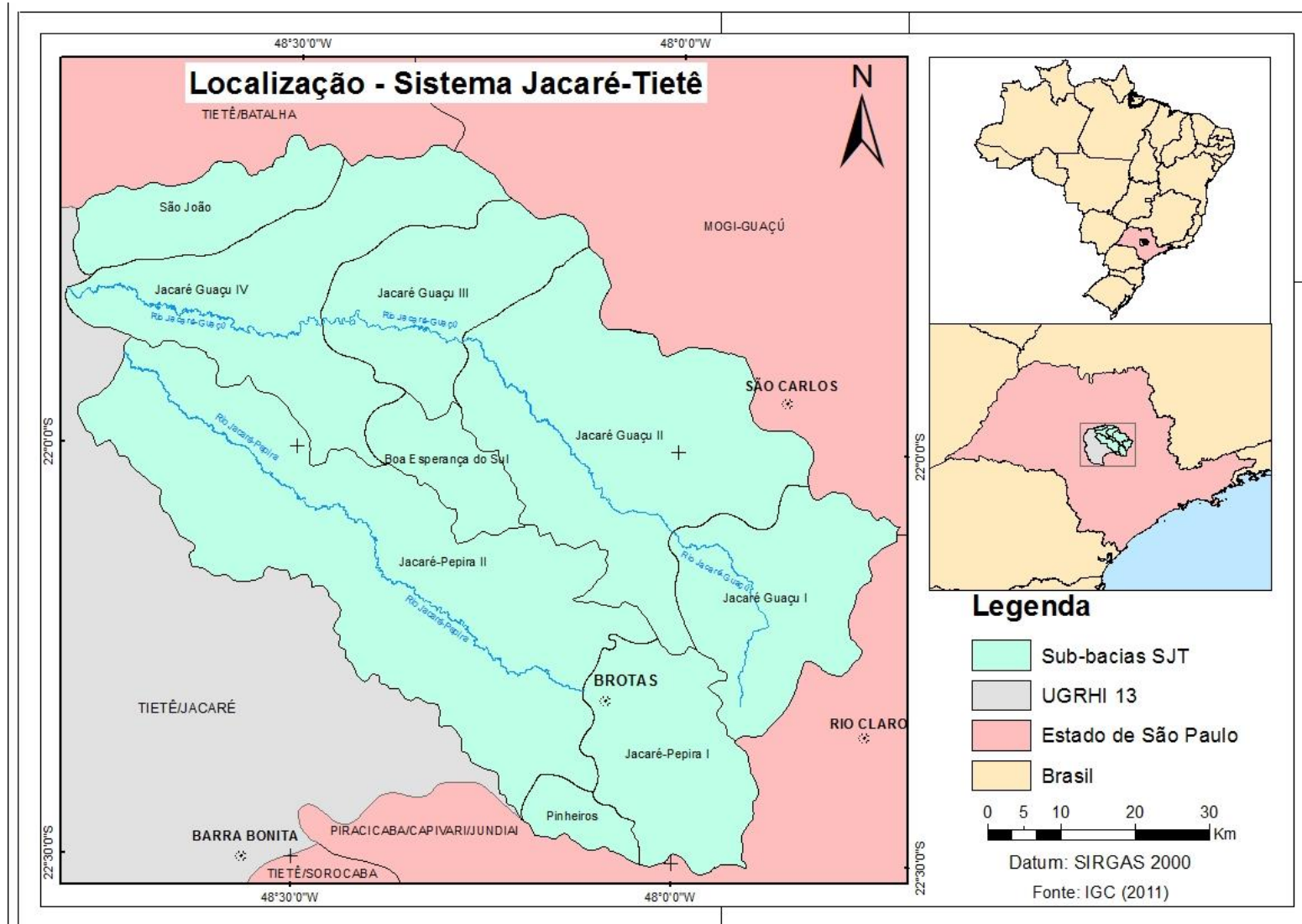


Figura 2. Localização da área de estudo

4.2. Pedologia Local

A partir do levantamento pedológico realizado por Oliveira e Almeida (2000) obteve-se a distribuição espacial dos tipos de solos presentes no Sistema Jacaré-Tietê (Figura 3). Apresenta-se a descrição de cada Ordem presente na área de estudo de acordo com a Classificação Brasileira de Solos (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, 2006):

4.2.1. Argissolos

Constituem-se por material mineral e têm como propriedade característica a presença de horizonte B textural (Bt) de argila de baixa atividade, ou a presença de argila de atividade alta conjugada com saturação por bases baixa, onde ocorre acúmulo de argila e concentração de alumínio trocável.

4.2.2. Latossolos

Constituem-se por material mineral com horizonte B latossólico, caracterizando-se pelo seu estágio avançado de intemperização. Nestes solos, o produto de transformações pedogenéticas origina solos bastante desenvolvidos, com baixa presença de minerais primários ou secundários, dada a baixa resistência destes minerais ao intemperismo.

4.2.3. Neossolos

Constituem-se por material mineral e se caracterizam pelo baixo nível de alteração em relação ao material de origem, sendo pouco desenvolvidos, como produto da baixa intensidade de intemperismo e pedogênese. Nesta Ordem de solos não há presença de horizonte B diagnóstico.

4.2.4. Nitossolos

Constituem-se por material mineral, caracterizando-se pela presença de horizonte B nítico – que tem aparência brilhante – e grande quantidade de argila em sua composição, o que resulta em textura argilosa ou muito argilosa.

4.2.5. Planossolos

Constituem-se por material mineral e são solos mal drenados, tendo como propriedade característica o caráter eluvial em seu horizonte superficial ou subsuperficial contrastando abruptamente com o horizonte sub ou sobrejacente, culminante em forte concentração de argila e baixa permeabilidade.

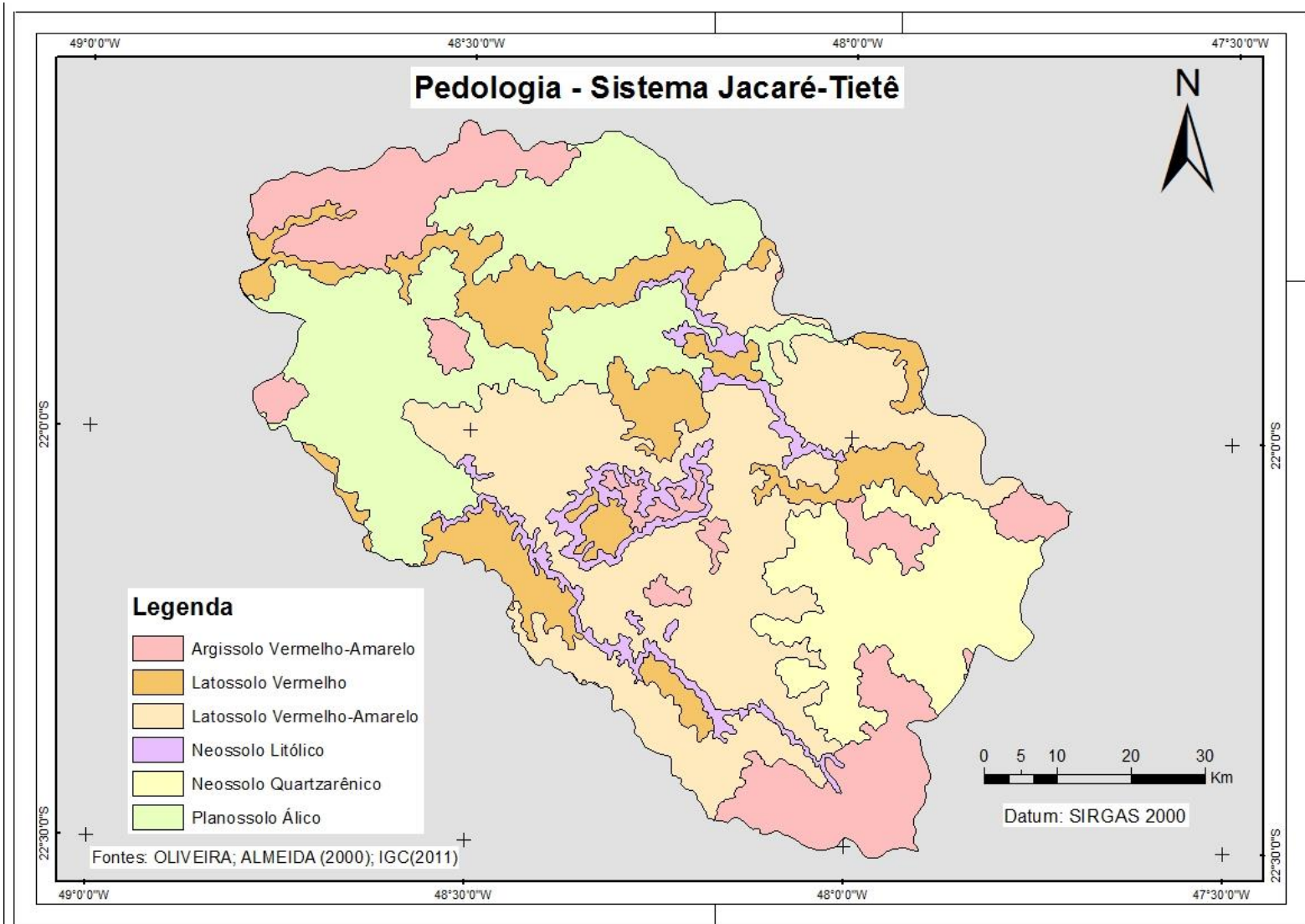


Figura 3. Mapa de solos da área de estudo

4.3. Geomorfologia e Geologia

O Sistema Jacaré-Tietê está inserido nas unidades geomorfológicas do Estado de São Paulo denominadas como Província Geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista, das Cuestas Basálticas e de Depressão Periférica (IPT, 1981; CORRÊA, 1995). Sua área de drenagem é de aproximadamente 6.339,6 km², com alta densidade de drenagens e predominância de relevo de baixa declividade, excetuando-se apenas a região Sudeste da bacia.

Dados obtidos do Modelo de Superfície do Terreno do SJT mostraram que a maior altitude encontrada na área de estudo foi de 1024 m, situada na região a montante do canal principal da bacia onde há alta densidade de nascentes e áreas de recarga dos aquíferos locais extensas. A menor altitude observada na área do SJT foi de 402 m, na região jusante do canal principal, onde ocorrem as planícies de inundação da bacia e áreas de descarga dos aquíferos. A geologia do SJT é constituída por litologias que pertencem ao Grupo São Bento, ao Grupo Bauru, à Formação Itaqueri e aos Depósitos Aluvionares (Figura 4).

Nesta área, o Grupo São Bento é composto pelas Formações Piramboia, Botucatu e Serra Geral. A Formação Piramboia é constituída por arenitos eólicos e fluviais com grãos arredondados e esféricos, com presença variada de lamitos (IPT, 1981), tendo sua origem associada a um ambiente de deposição continental fluvial e lacustre (SOARES; LANDIM, 1975).

A Formação Botucatu é composta por arenitos eólicos bem selecionados, com grãos arredondados, concomitantes à presença variada de lamitos (IPT, 1981), sendo originada em ambiente de deposição eólica continental (SOARES; LANDIM, 1975). Posicionada litoestratigraficamente acima da Formação Piramboia, ambas compõem o SAG (DAEE; IG; IPT; CPRM, 2005).

A Formação Serra Geral é constituída por rochas basálticas oriundas de derrames fissurais (IPT, 1981), tendo sua origem associada à ruptura do Gondwana, iniciando a separação entre África e América do Sul.

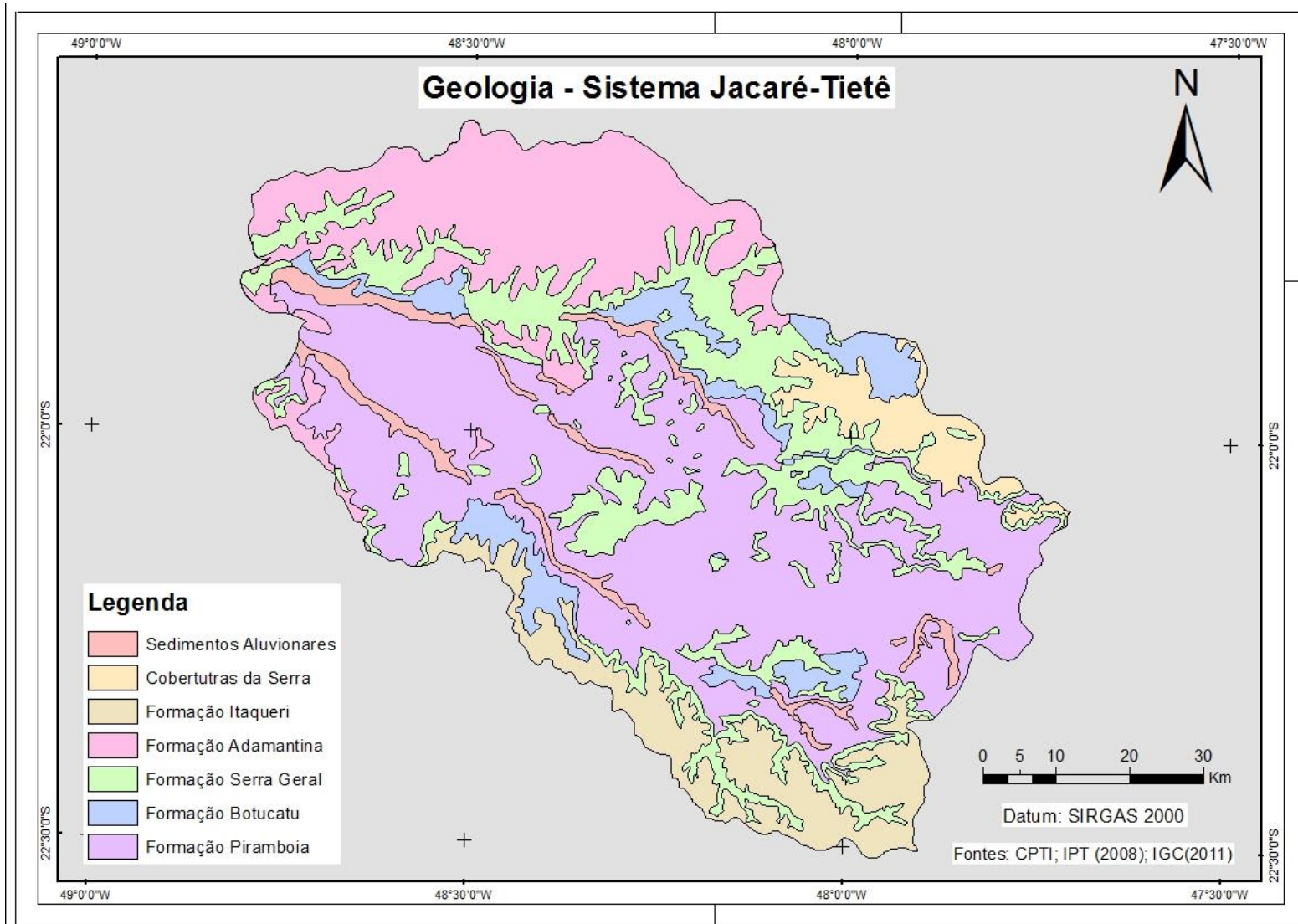


Figura 4. Geologia da área de estudo

A Formação Adamantina, que compõe o Grupo Bauru, é composta por sedimentos de granulometria fina, sendo predominantemente formada por arenitos e lamitos fluviais (SOARES; LANDIM, 1975), com presença frequente de micas, podendo ocorrer outros minerais como feldspatos e quartzo (IPT, 1981).

Por sua vez, a Formação Itaqueri é principalmente composta por arenitos e conglomerados, com silicificação e estratificações cruzadas abundantes (IPT, 1981). Seu ambiente de formação está associado à sedimentação de leques aluviais (PERINOTTO; LINO, 2007), compondo a Aquífero Cenozóico na região estudada (DAEE; IG; IPT; CPRM, 2005).

Por fim, os Sedimentos Aluvionares presentes no SJT referem-se a sedimentos arenosos pouco consolidados, onde podem ocorrer lentes de argilas e alguma ocorrência de materiais grosseiros na base, podendo ser areias, cascalhos, siltes e argilas (IPT, 1981). Seu ambiente formacional está relacionado ao resultado de processos erosivos, de transporte e deposição continental em planície aluvial, lacustres e coluviões, constituindo margens, fundos de canal e planícies de inundação de rios (SOARES; LANDIM, 1975; CPRM, 2005).

5. MÉTODO DE TRABALHO

Apresenta-se o roteiro metodológico do presente trabalho, a descrição completa do método DRASTIC e das principais atividades e operações executadas para obtenção do mapeamento da vulnerabilidade.

5.1. Procedimentos metodológicos adotados

As atividades executadas no presente trabalho foram realizadas conforme o fluxograma a seguir (Figura 5):

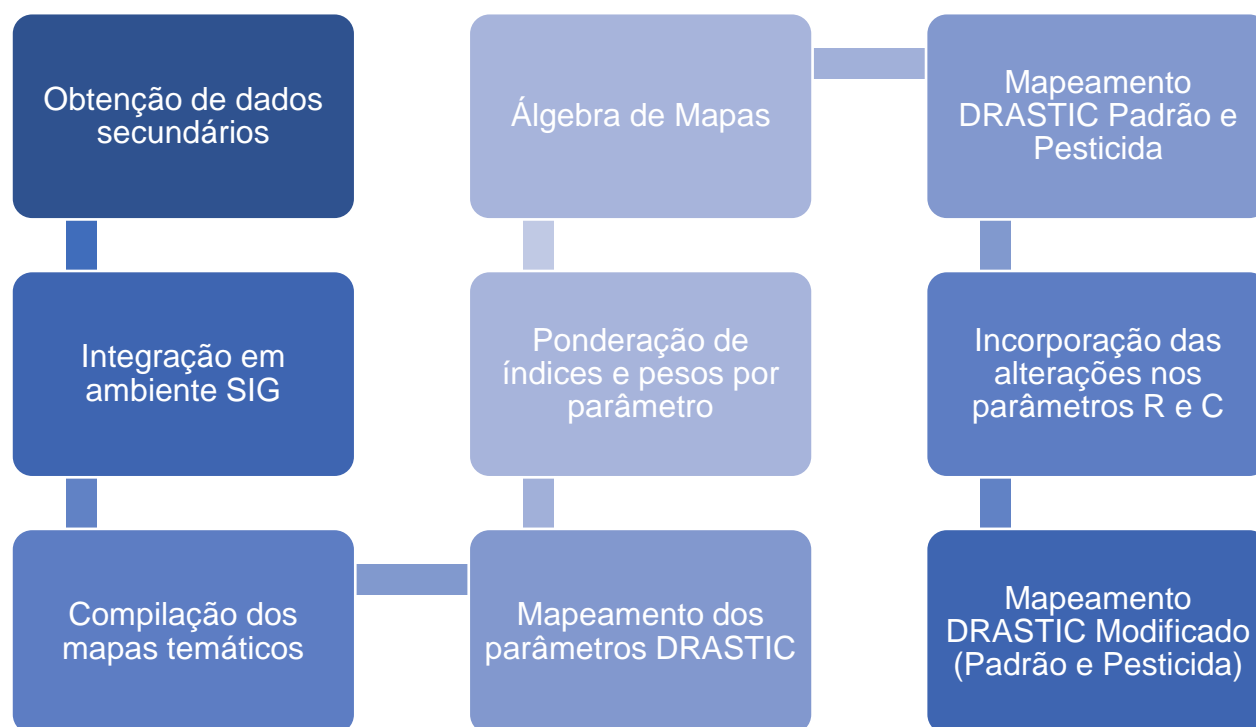


Figura 5. Fluxograma das atividades executadas

5.2. O método DRASTIC

O acrônimo DRASTIC representa os sete parâmetros contemplados em seu sistema de avaliação da vulnerabilidade intrínseca (Figura 6), sendo:

D – **D**epth to water (Profundidade do nível d'água);

R – **R**et **R**echarge (Recarga do aquífero);

A – **A**quifer media (Material do aquífero);

S – **S**oil media (Tipo de solo);

T – **T**opography (Topografia);

I – **I**mpact of vadose zone media (Influência do material da zona vadosa);

C – **C**onductivity of the aquifer (Condutividade hidráulica do aquífero).

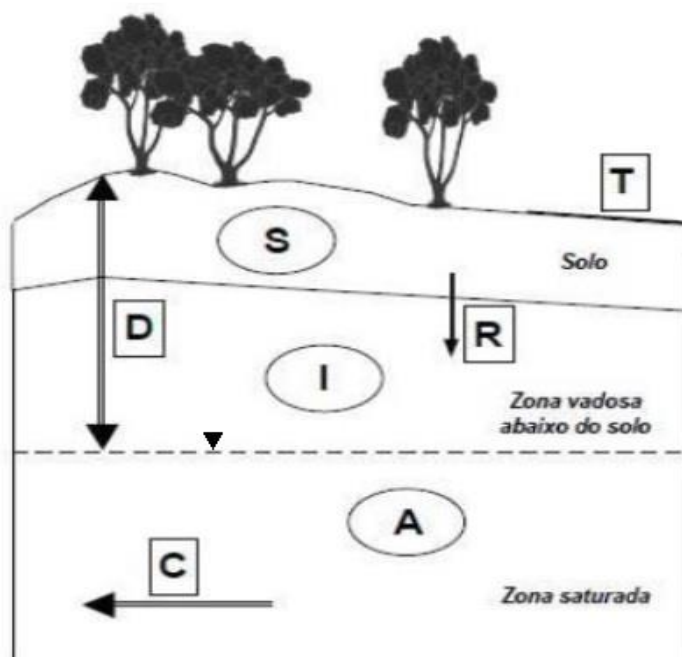


Figura 6. Representação gráfica dos parâmetros DRASTIC

Fonte: adaptado de LNEC, 2002.

Os parâmetros considerados no método DRASTIC são incorporados a um esquema de ponderação aritmética, que é automatizado em ambiente SIG e tem como principal produto o mapeamento da vulnerabilidade intrínseca do meio físico

na região de interesse. A somatória ponderada DRASTIC é representada pela fórmula 1:

$$\text{DRASTIC} = Dp \times Di + Rp \times Ri + Ap \times Ai + Sp \times Si + Tp \times Ti + Ip \times Ii + Cp \times Ci \quad (1)$$

Onde:

p – peso por parâmetro

i – índice de cada parâmetro

Conforme descreveram Mota Pais, Antunes e Albuquerque (2012), neste cálculo cada parâmetro é dividido em subclasses que representam aspectos da hidrogeologia local, às quais se atribui um índice (*i*) que varia de 1 a 10 que, em seguida, são multiplicados pelo peso (*p*) de cada parâmetro correspondente.

Aller et al. (1985; 1987) estruturam o método DRASTIC como uma ferramenta de planejamento que também pode ser direcionada para regiões predominantemente agrícolas, subdividindo-o nas versões Padrão e Pesticidas.

Para DRASTIC Padrão, a mobilidade e as interações físicas do contaminante com o meio ambiente subterrâneo são semelhantes à da água. Para DRASTIC Pesticidas, considera-se um pesticida típico como contaminante potencial, com mobilidade maior que a da água e diferentes interações físicas com o meio. Estas diferenças são contempladas no método pela ponderação de diferentes pesos por parâmetro em cada versão variando de 1 a 5 (Tabela 1).

Tabela 1. Pesos (*p*) dos parâmetros DRASTIC.

	D	R	A	S	T	I	C
Padrão	5	4	3	2	1	5	3
Pesticida	5	4	3	5	3	4	2

5.2.1. Parâmetros do método DRASTIC

Apresenta-se a descrição sucinta de cada parâmetro DRASTIC, em consonância com o enunciado por Aller et al. (1985; 1987).

A Profundidade do NA (Tabela 2) representa a espessura de material consolidado (solo e zona vadosa) que um potencial contaminante inserido na

superfície do terreno terá que percorrer até atingir o lençol freático. Profundidades maiores acarretam em maiores tempos de trânsito para um contaminante atingir o aquífero, possibilitando a ocorrência de processos de atenuação natural, enquanto pequenas profundidades demandam tempos de trânsito baixos, possibilitando ao contaminante atingir a zona saturada do aquífero rapidamente.

Tabela 2. Valores dos índices do parâmetro D.

Profundidade (m)	< 1,5	1,5-4,6	4,6-9,1	9,1-15,2	15,2-22,9	22,9-30,5	> 30,5
Índice	10	9	7	5	3	2	1

A Recarga (Tabela 3) refere-se à quantidade de água pluvial que infiltra na superfície do terreno e atravessa a zona vadosa, alcançando o lençol freático. Sua importância está associada ao potencial de transporte de contaminantes por fluxo vertical. Quanto maior a quantidade de água, maiores quantidades de contaminantes podem ser transportadas e com maior velocidade em direção à zona saturada aquífero.

Tabela 3. Valores dos índices do parâmetro R.

Recarga (mm/ano)	< 51	51-102	102-178	178-254	> 254
Índice	1	3	6	8	9

O parâmetro material do aquífero (Tabela 4) faz referência à influência das características dos aquíferos na mobilidade de contaminantes no meio físico, sobretudo em relação à composição morfo-granulométrica, textura e permeabilidade. Em aquíferos menos favoráveis ao deslocamento dos contaminantes, há maior potencial de retenção física e potencial de ocorrência de reações físico-químicas, o que aumenta seu tempo de trânsito e pode favorecer processos de atenuação natural.

Tabela 4. Valores dos índices do parâmetro A.

Natureza do Aquífero	Índice
Xisto argiloso	1-3
Rocha metamórfica/ígneia	2-5
Rocha metamórfica/ígneia alterada	3-5
“Till” glacial	4-6
Arenito, calcário e argilito estratificados	5-9
Arenito maciço	4-9
Calcário maciço	4-9
Areia e cascalho	4-9
Basalto	2-10
Calcário carstificado	9-10

O tipo de solo (Tabela 5) influencia a hidrodinâmica local de modo semelhante ao material do aquífero, entretanto, trata-se aqui do solo agrícola acima da zona vadosa (Figura 6 - supracitada). Para ponderação dos índices, são consideradas as quatro principais características do solo que condicionam a mobilidade de contaminantes no meio: espessura; textura; expansibilidade e teor de matéria orgânica (ALLER et al., 1985, 1987; LNEC, 2002). Assim, solos mais arenosos tendem a ter maior vulnerabilidade do que solos mais argilosos, dado que grandes volumes de água contaminada podem migrar livremente em curtos períodos de tempo pelos espaços vazios interconectados.

Tabela 5. Valores dos índices do parâmetro S.

Tipo de Solo	Índice
Pouco espesso ou ausente	10
Cascalho	10
Areia	9
Turfa	8
Argila expansível	7
Franco arenoso	6
Franco	5
Franco siltoso	4
Franco argiloso	3
Argila orgânica	2
Argila não-expansível	1

O parâmetro Topografia remete à declividade do terreno na área estudada no que concerne à mobilidade hídrica na superfície do terreno, diferenciando o potencial de escoamento superficial ou de infiltração. Menores declividades resultam em movimentação lenta da água, favorecendo a infiltração da água e contaminantes potenciais no solo. Em áreas de altas declividades, há predominância de fluxo superficial e velocidades altas do fluxo da água, desfavorecendo a infiltração no solo, mas possibilitando a ocorrência de processos erosivos agressivos do solo, que podem resultar em sulcos, ravinas e voçorocas (Tabela 6).

Tabela 6. Valores dos índices do parâmetro T.

Topografia (Declividade em %)	Índice
<2	10
2 - 6	9
6- 12	5
12 - 18	3
>18	1

A Zona Vadosa (Tabela 7) corresponde à área não saturada acima da zona saturada do aquífero, incluindo o nível d'água do lençol freático intermitente. Após ser introduzido na superfície e infiltrar no solo, o contaminante migra verticalmente pela zona vadosa até alcançar o aquífero. As configurações hidrogeológicas da zona vadosa determinam o tempo de contato do contaminante com o meio físico durante esta movimentação.

Em linhas gerais, quanto maior o potencial de retenção na zona vadosa, maior o tempo de trânsito do contaminante e, portanto, maior a possibilidade de ocorrência de processos de atenuação natural. Entretanto, há situações que podem diminuir a influência deste parâmetro, como em áreas onde o solo é muito permeável e o nível d'água subterrânea fica próximo à superfície do terreno.

Tabela 7. Valores dos índices do parâmetro I.

Influência da Zona Vadosa	Índice
Camada confinante	1
Argila/Silte	2-6
Xisto argiloso, argilito	2-5
Calcário	2-7
Arenito	4-8
Arenito, calcário e argilito estratificados	4-8
Areia e cascalho com % significativa de silte e argila	4-8
Rocha metamórfica/Ígnea	2-8
Areia e cascalho	6-9
Basalto	2-10
Calcário carstificado	8-10

A Condutividade Hidráulica (Tabela 8) é o parâmetro que representa a facilidade ou dificuldade de movimentação da água nos poros, fraturas e cavidades na zona saturada do aquífero. Quanto mais espaços vazios interconectados presentes na formação aquífera, maior a disponibilidade de

possíveis caminhos para água e, portanto, maior a facilidade de movimentação do contaminante pelo aquífero.

Tabela 8. Valores dos índices do parâmetro C.

Condutividade Hidráulica (m/dia)	Índice
< 4,1	1
4,1 - 12,2	2
12,2 - 28,5	4
28,5 - 40,7	6
40,7 - 81,5	8
> 81,5	10

5.2.2. Obtenção dos parâmetros DRASTIC

As informações que compuseram os mapas dos parâmetros DRASTIC foram obtidas a partir de dados secundários. Destaca-se, assim, que buscou-se consultar referências em trabalhos de acesso gratuito realizados por instituições reconhecidamente confiáveis do ponto de vista técnico e científico. Neste trabalho, as operações de geoprocessamento foram realizadas no software ArcGIS® 10.1 (ESRI, 2012), licenciado pela Universidade Federal de São Paulo.

Após obtenção dos dados, as operações em ambiente SIG foram iniciadas pela criação do Modelo de Superfície do Terreno (MST), que se trata de um modelo em três dimensões (latitude, longitude e altitude) utilizado para o mapeamento da superfície de todo o terreno da área de estudo. Para tanto, foram interpoladas as cotas topográficas de 305 poços obtidos no banco de dados do IPT (CPTI; IPT, 2008); as cotas topográficas de 1841 poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS/CPRM (2017); e as cotas topográficas de pontos cotados, rede de drenagem e curvas topográficas obtidas junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2014).

Para a determinação da área de estudo no ambiente SIG, foram utilizados *shapefiles* denominados “Limites de UGRHI” publicados pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo - IGC/SP (2010) e “Limite Municipal SP”

(IGC, 2015) disponíveis, conforme referência, no banco de dados “DataGeo” que é gratuito e aberto ao público para download.

Em seguida, foi elaborado o MST referente à modelagem da superfície potenciométrica da área de estudo. Destaca-se que os pontos representados pelas intersecções entre os corpos d’água superficiais e as linhas topográficas foram considerados pontos de afloramento de água subterrânea e a potenciometria têm valor igual a cota da superfície do terreno.

Assim sendo, foram utilizados os vértices entre a rede de drenagem e as curvas topográficas (IBGE, 2014); informações de potenciometria obtidas de poços de monitoramento (CPTI; IPT, 2008); poços de monitoramento do SIAGAS/CPRM (2017); e a rede de drenagem do IBGE (2014).

Para obtenção do mapeamento do parâmetro D foi realizada a subtração entre o MST da superfície do terreno e o MST da potenciometria, que resultou na distância entre a superfície do terreno e o nível d’água subterrânea. O parâmetro T foi obtido a partir do cálculo da declividade em porcentagem, utilizando-se o software ArcGIS® 10.1 (ESRI, 2012), na área estudada a partir do MST da área de estudo. A resolução obtida para os parâmetros D e T foi de 30 m² por pixel.

O parâmetro R foi mapeado a partir da normalização de dados de Pluviosidade levantados junto à CPRM (SIAGAS/CPRM, 2017), eliminando-se dados inconsistentes e anomalias observadas. Após esta triagem, estes dados foram tratados utilizando-se o método de Decomposição de Hidrogramas “*DecHidr*” (OLIVEIRA, 2005), que resultou no escoamento subsuperficial (recarga) para cada sub-bacia da área de estudo, conforme a concepção de Aller et al. (1985; 1987).

Os mapeamentos dos parâmetros A, I e C foram realizados a partir da espacialização do Mapa Geológico, que foi elaborado pelo IPT e compilado no trabalho publicado por CPTI e IPT (2008) denominado “Revisão do Plano de Bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Tietê-Jacaré (UGRHI 13)”. A ponderação dos índices de cada parâmetro foi realizada pela conjunção entre revisão bibliográfica e considerando-se as diferentes feições constituintes,

de acordo com a aplicabilidade de cada parâmetro (DAEE; IG; IPT; CPRM, 2005; CPTI; IPT, 2008).

Relativamente aos parâmetros alterados, os dados do parâmetro Recarga dos Aquíferos - Modificado foram obtidos do trabalho publicado por Rabelo (2006). Neste trabalho, diferentemente do parâmetro R descrito por Aller et al. (1985; 1987), consta a distribuição espacial das recargas relativas a cada unidade litológica na área de estudo. Por sua vez, o mapa de Cobertura do Solo foi obtido de um trabalho realizado em conjunto publicado pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA), a Coordenadoria de Planejamento Ambiental (CPLA), o Departamento de Informações Ambientais (DIA) e o Centro de Integração e Gerenciamento de Informações (CIGI) em formato *shapefile*, na escala 1:100.000 (SMA; CPLA; DIA; CIGI, 2013), sendo somente necessária sua adequação aos índices dos parâmetros DRASTIC.

5.2.3. Classes de vulnerabilidade DRASTIC

A estimativa da vulnerabilidade para o método DRASTIC Padrão pode variar entre o valor 23 (baixa) e 226 (muito alta). Para o DRASTIC Pesticidas, por conta das diferenças consideradas na ponderação dos pesos (p) por parâmetro, a vulnerabilidade pode variar entre o valor 29 (baixa) e 256 (muito alta). Para facilitar a compreensão e melhorar a visualização gráfica dos mapas, Aller et al. (1985; 1987) propuseram a seguinte subdivisão da vulnerabilidade obtida pelo método DRASTIC Padrão e Pesticidas (Tabela 9):

Tabela 9. Classes de vulnerabilidade – DRASTIC.

Classe	Intervalo
Vulnerabilidade Baixa	Menor que 120
Vulnerabilidade Moderada	Entre 120 e 159
Vulnerabilidade Alta	Entre 159 e 199
Vulnerabilidade Muito Alta	Maior que 199

Embora a subdivisão de classes criada por Aller et al. (1985; 1987) cumpra sua função de diferenciar as classes de vulnerabilidade, detectou-se a

necessidade de diminuir as generalizações causadas pela utilização de apenas quatro classes no mapeamento da vulnerabilidade. Para tanto, propôs-se a inserção de mais três classes na graduação das classes de vulnerabilidade exibidas nos mapas DRASTIC, sendo: Vulnerabilidade Baixa – Moderada; Vulnerabilidade Moderada – Alta; e Vulnerabilidade Alta - Muito Alta (Tabela 10).

Tabela 10. Classes de vulnerabilidade - DRASTIC Modificado.

Classe	Intervalo
Vulnerabilidade Baixa	Menor que 110
Vulnerabilidade Baixa - Moderada	Entre 110 e 129
Vulnerabilidade Moderada	Entre 129 e 149
Vulnerabilidade Moderada - Alta	Entre 149 e 169
Vulnerabilidade Alta	Entre 169 e 189
Vulnerabilidade Alta – Muito Alta	Entre 189 e 209
Vulnerabilidade Muito Alta	Maior que 209

Com isso, acredita-se que as áreas mais suscetíveis à contaminação antrópica sejam destacadas visualmente nos mapas de vulnerabilidade apresentados, demarcando com as classes “Vulnerabilidade Alta - Muito Alta” e “Vulnerabilidade Muito Alta” as áreas onde o direcionamento de esforços institucionais e financeiros do poder público deve ser prioritário.

Todavia, a adoção de ações públicas nestas áreas não pode ser tratada como resolução definitiva, mas sim como atividades que motivem práticas preventivas nas áreas indicadas com as demais classes de vulnerabilidade, considerando-se também a delimitação de áreas não prioritárias, de modo que os recursos públicos sejam direcionados do modo mais eficiente possível em prol da conservação dos recursos hídricos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões são apresentados em três subseções; a primeira refere-se ao tratamento dos dados para o mapeamento dos parâmetros DRASTIC, a segunda refere-se à estimativa da vulnerabilidade intrínseca utilizando o método DRASTIC Padrão e DRASTIC Pesticidas e a terceira apresenta os parâmetros modificados, os resultados concernentes à vulnerabilidade e as discussões relacionadas.

6.1. Tratamento dos Dados

A obtenção dos dados secundários de interesse permitiu a construção de um banco de dados robusto, onde foram atribuídos os índices de cada parâmetro DRASTIC. Apresenta-se na Tabela 11 a relação dos índices atribuídos a cada classe de vulnerabilidade de cada um dos parâmetros. Também pode-se verificar os pesos por parâmetro para DRASTIC Padrão na coluna “Peso Pad” e DRASTIC Pesticidas na coluna “Peso Pest”.

Tabela 11. Classes, índices e pesos por parâmetro na área do SJT.

Parâmetro	Classe	Índice	Peso Pad	Peso Pest
D	> 30,5 m	1	5	5
	22,9 - 30,5 m	2	5	5
	15,2 - 22,9 m	3	5	5
	9,1 - 15,2 m	5	5	5
	4,6 - 9,1 m	7	5	5
	1,5 - 4,6 m	9	5	5
	< 1,5 m	10	5	5
R	> 254 mm/ano	9	4	4
A	Arenitos estratificados, intercalações de argilitos e lentes arenosas	4	3	3
	Arenito e lamitos fluviais estratificados	5	3	3
	Arenito, calcário e argilito com estratificação média	6	3	3
	Arenitos eólicos selecionados	7	3	3
	Arenito de formação eólica e fluvial/Basalto	8	3	3
	Arenitos pouco consolidados	9	3	3
S	Argissolo Vermelho-Amarelo	3	2	5
	Planossolo Álico	4	2	5
	Latossolo Vermelho	5	2	5
	Latossolo Vermelho-Amarelo	5	2	5
	Neossolo Litólico	7	2	5
	Neossolo Quartzarênico	9	2	5
T	> 18 %	1	1	3
	12- 18 %	3	1	3
	6 – 12 %	5	1	3
	2 – 6 %	9	1	3
	< 2%	10	1	3
I	Arenitos estratificados, intercalações de argilitos e lentes arenosas	4	5	4
	Arenito e lamitos fluviais estratificados	5	5	4
	Arenito, calcário e argilito com estratificação média	6	5	4
	Arenitos eólicos selecionados	7	5	4
	Arenito de formação eólica e fluvial/Basalto	8	5	4
	Arenitos pouco consolidados	9	5	4
C	< 4,1 m/d	1	3	2

Após a o tratamento dos dados de cada parâmetro DRASTIC procedeu-se ao geoprocessamento das informações espaciais em ambiente SIG, resultando nos produtos:

- Mapa do parâmetro D (Profundidade do nível d'água): referente à distribuição geo-espacial da espessura da zona não saturada, ou seja, a distância entre a superfície do terreno e o lençol freático (Figura 7);
- Mapa do parâmetro R (Recarga): se refere ao mapeamento do potencial de infiltração de água pluvial no solo tendo como limites periféricos as sub-bacias inseridas na área do SJT (Figura 8);
- Mapa do parâmetro A (Material dos Aquíferos): descreve a espacialização dos materiais predominantemente constituintes das litologias que compõem a zona saturada no SJT (Figura 9);
- Mapa do parâmetro S (Tipos de Solos); apresenta o mapeamento pedológico no SJT (Figura 10);
- Mapa do parâmetro T (Topografia); mostra as variações de declividade no SJT (Figura 11);
- Mapa do parâmetro I (Influência da Zona Vadosa); apresenta a geo-espacialização das litologias que compõe a zona não saturada no SJT (Figura 12);
- Mapa do parâmetro C (Condutividade Hidráulica); referente a distribuição espacial das litologias presentes no SJT no que concerne à velocidade de movimentação de fluídos nas diferentes unidades geológicas (Figura 13).

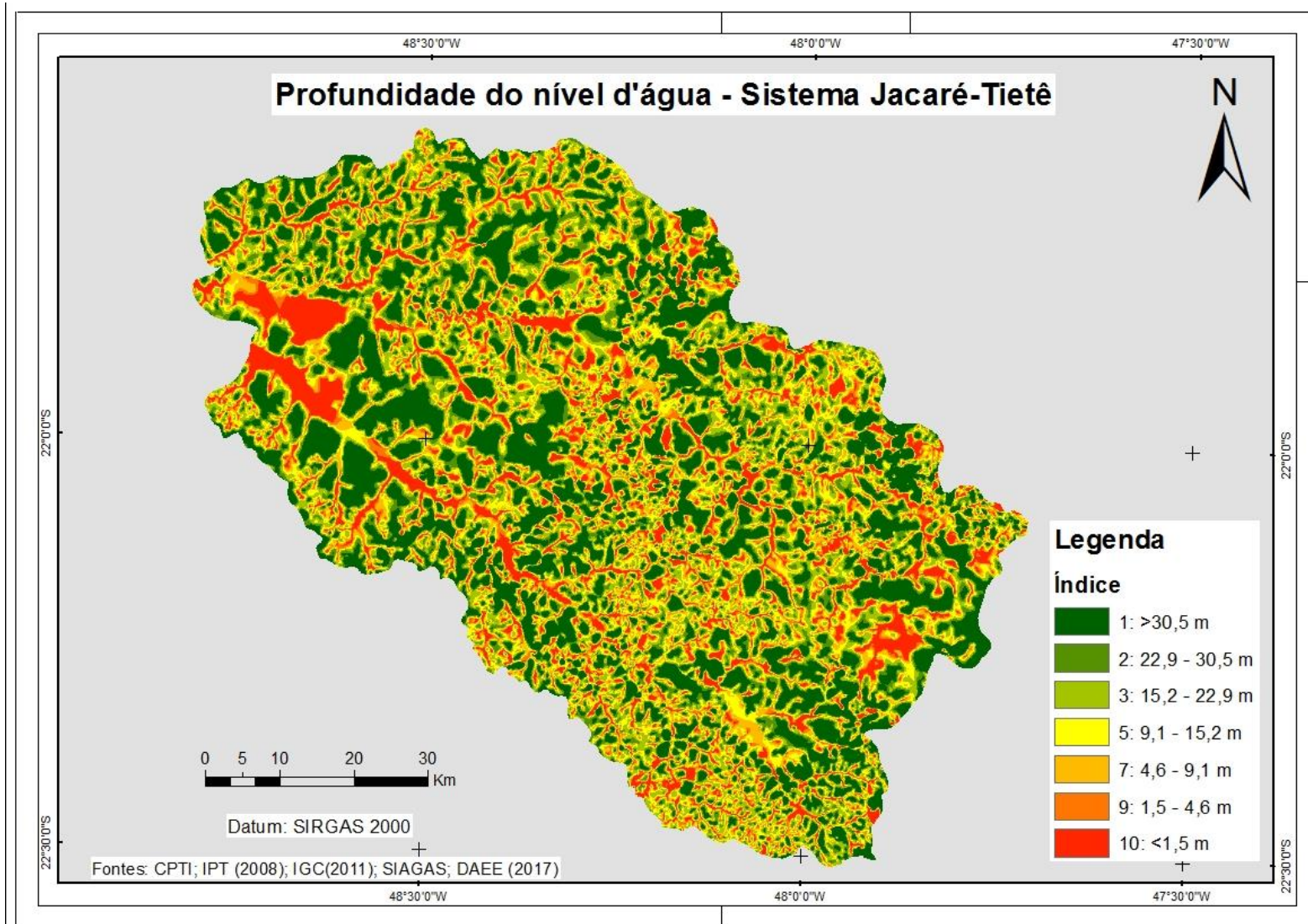


Figura 7. Mapa do parâmetro D – Profundidade no nível d'água

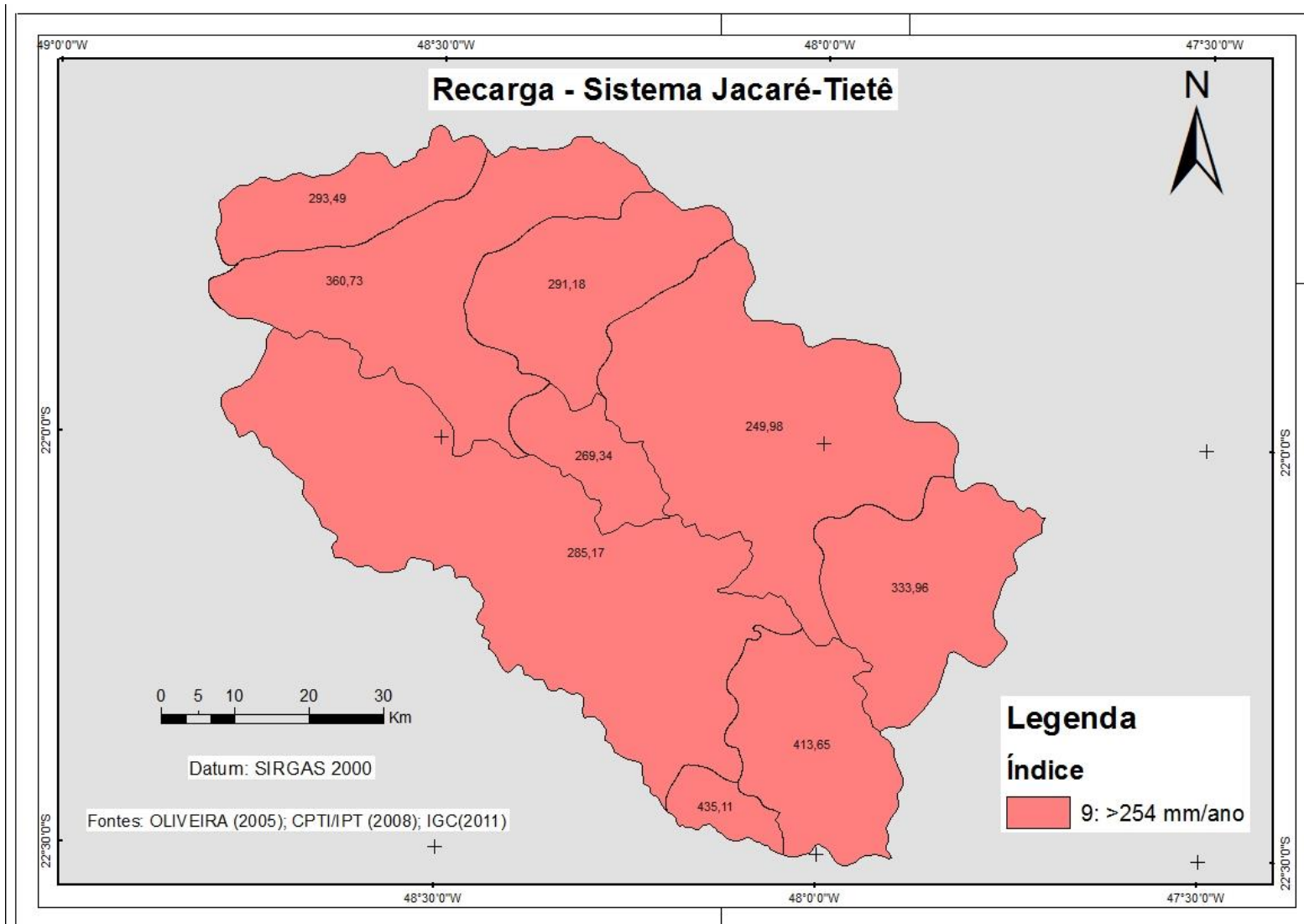


Figura 8. Mapa do parâmetro R – Recarga do aquífero livre

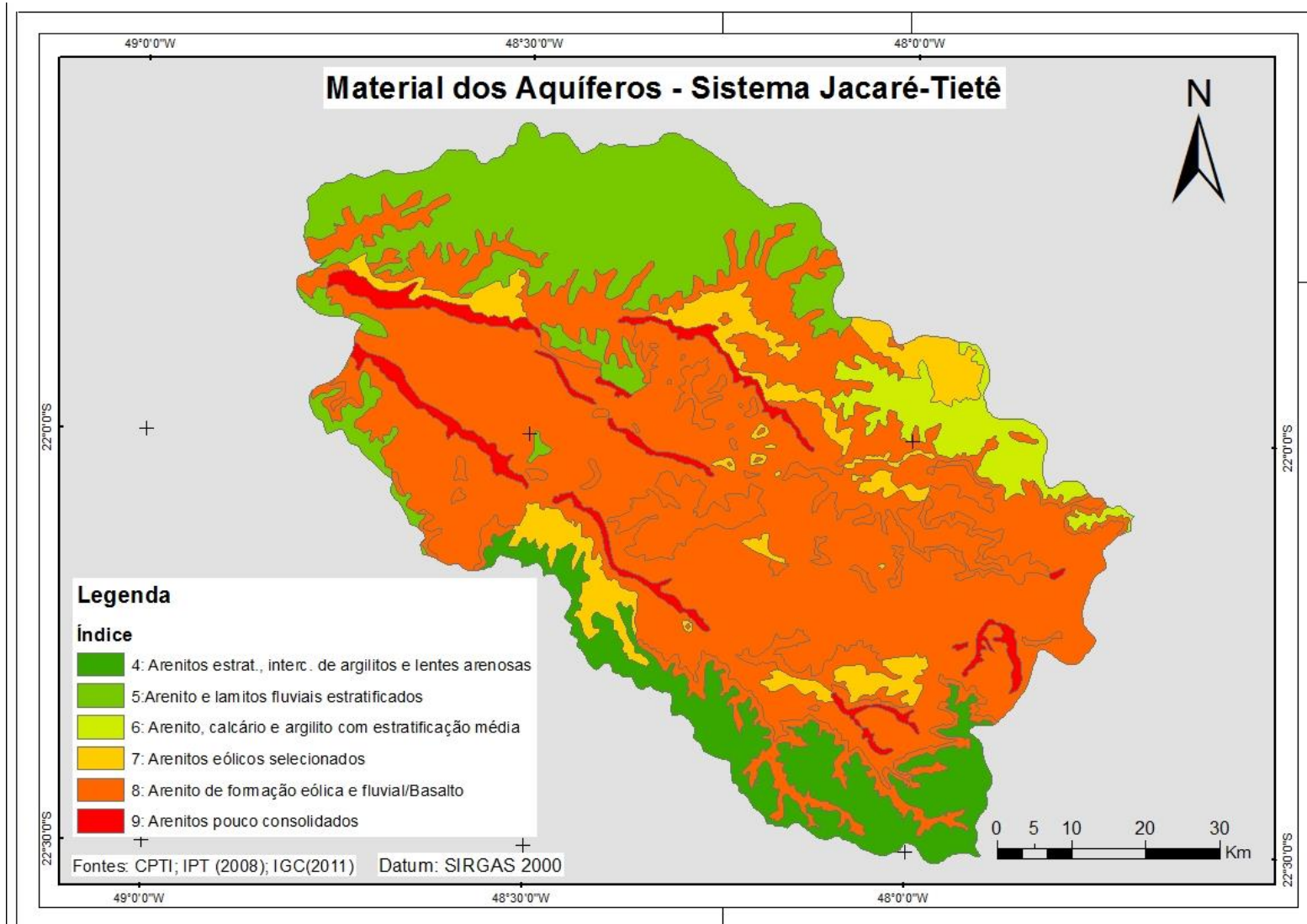


Figura 9. Mapa do parâmetro A – Material dos aquíferos

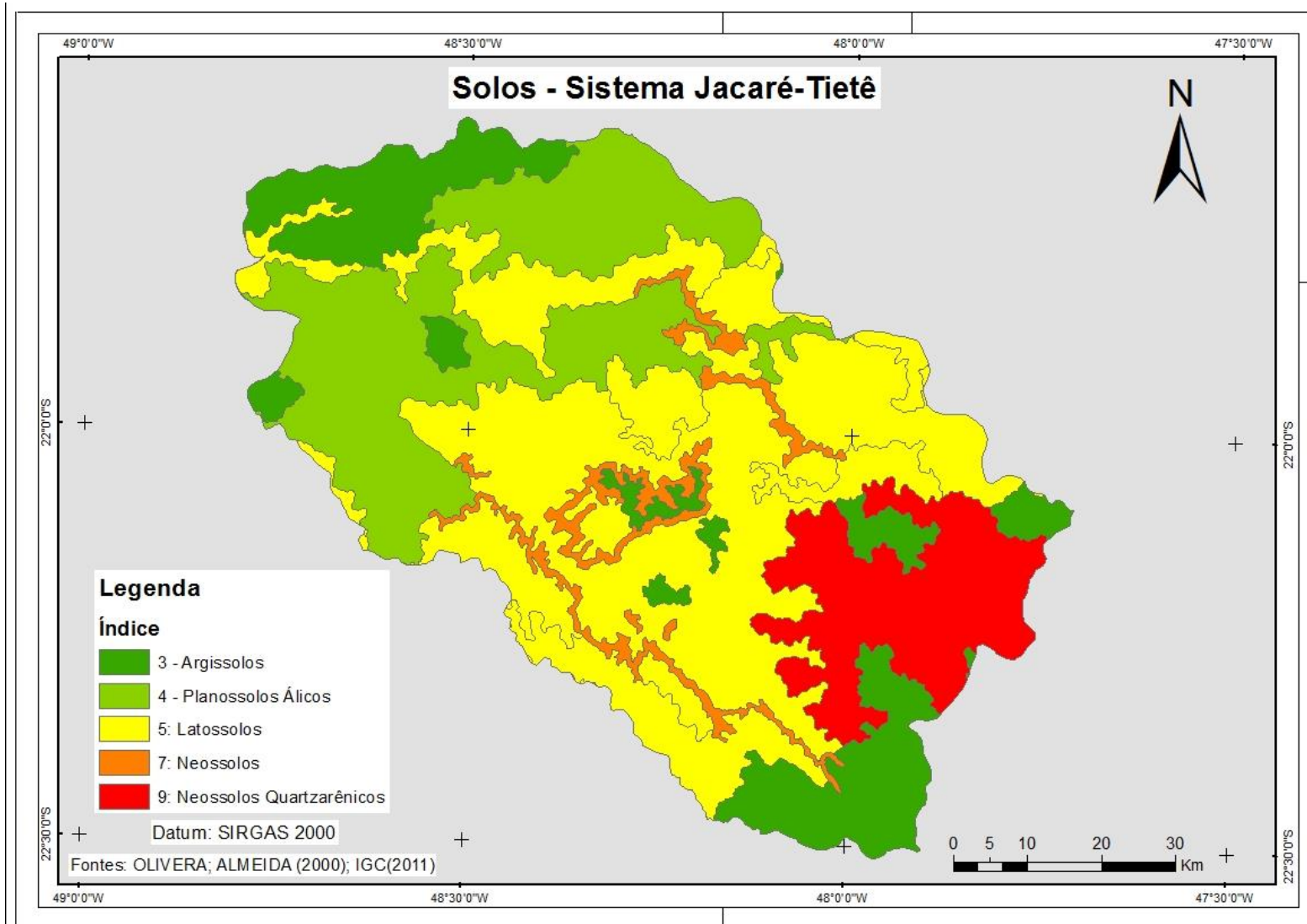


Figura 10. Mapa do parâmetro S – Tipos de solos

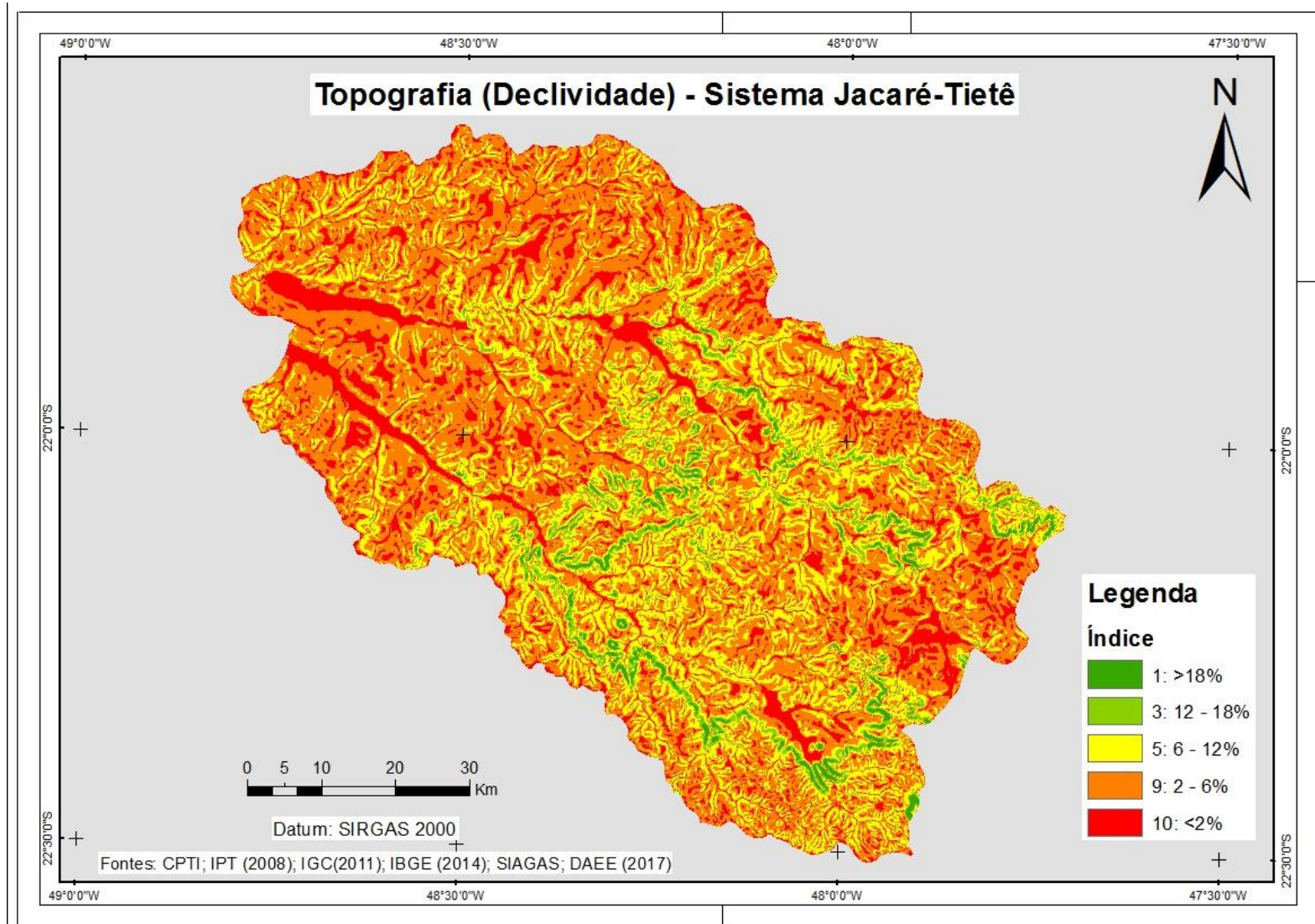


Figura 11. Mapa do parâmetro T – Topografia (declividade)

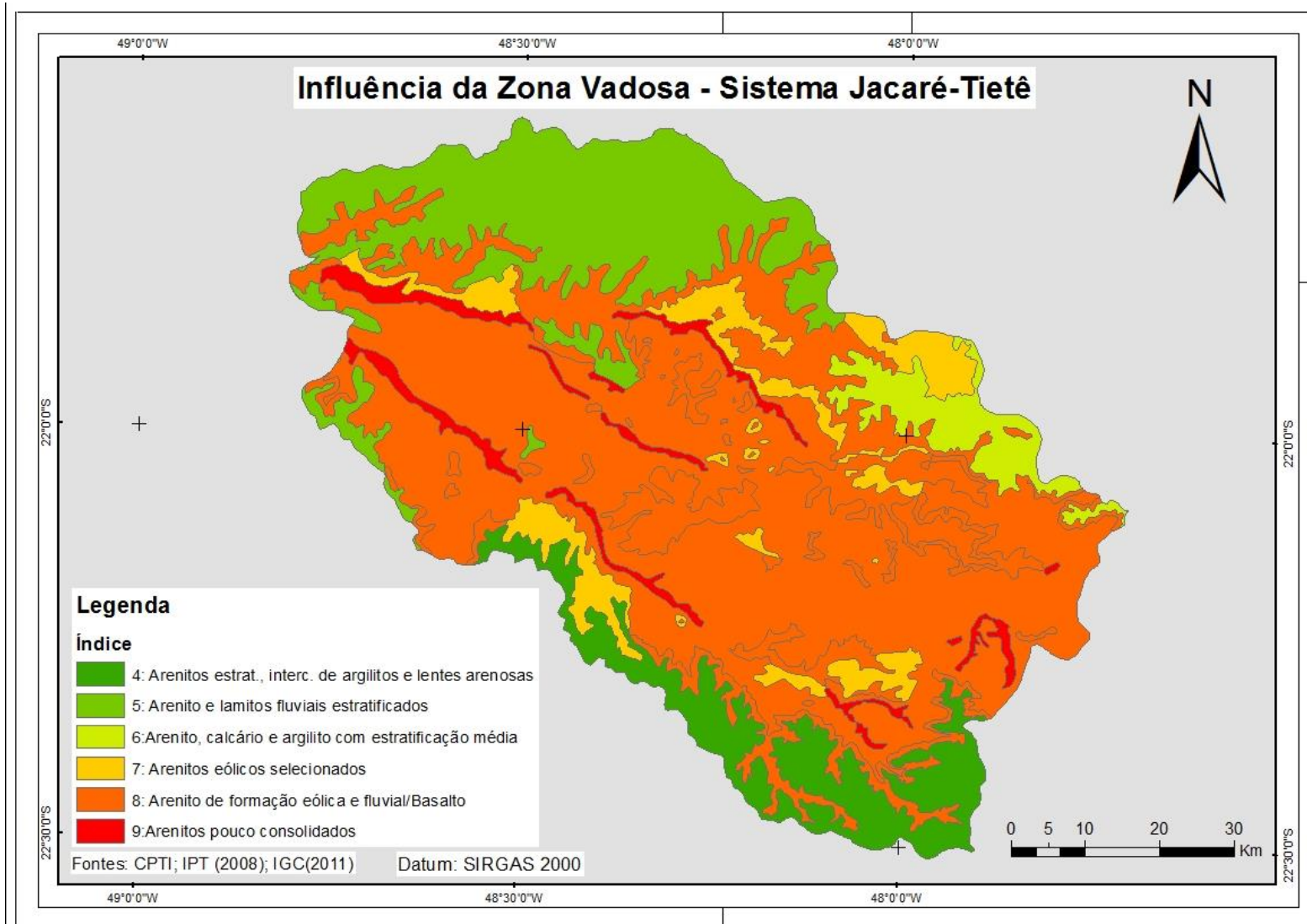


Figura 12. Mapa do parâmetro I – Influência da zona vadosa

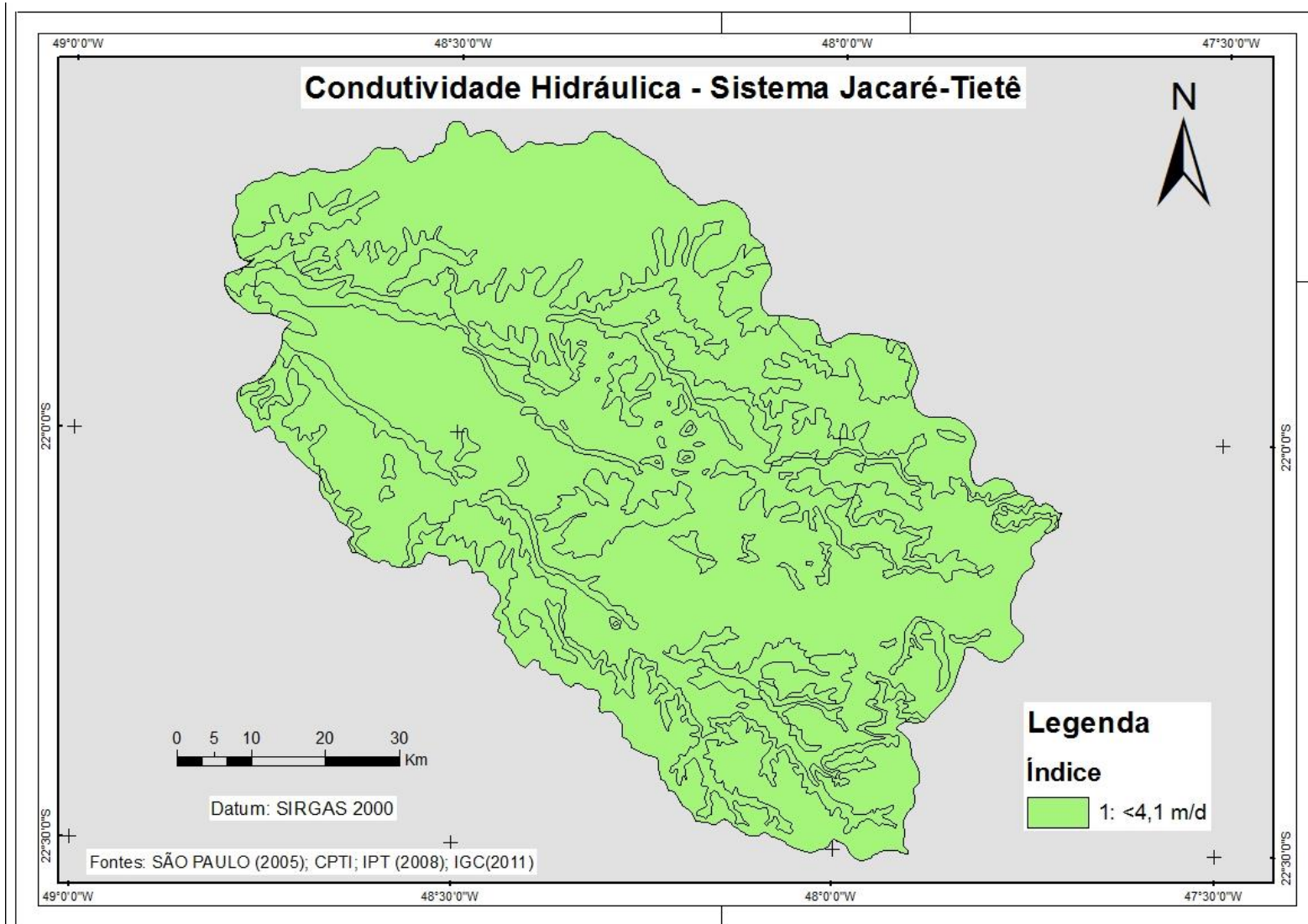


Figura 13. Mapa do parâmetro C – Condutividade Hidráulica

O mapeamento do parâmetro D possibilitou verificar um padrão em sua distribuição espacial, que consiste na sua relação com as áreas de interflúvios e com a presença dos corpos d'água. As menores profundidades se situam no percurso e no entorno dos corpos d'água superficiais, evidenciando a diminuição contínua da profundidade na direção do afloramento das águas subterrâneas e nas zonas de recarga dos corpos superficiais. No sentido inverso, tem-se um gradiente de profundidades até a classe de profundidades maiores que 30 m, que estão principalmente nas zonas de interflúvios no limite periférico entre as áreas de recarga de cada corpo d'água.

Também é possível notar pontos com vulnerabilidades altas na parte Noroeste da área de estudo devido às áreas de várzea dos rios Jacaré-Pepira (mais ao Sul) e Jacaré-Guaçú (mais ao Norte), onde se observaram áreas relativamente extensas com profundidades menores que 5 m. Na porção Sudeste da área de estudo há predominância de profundidades de 9,1 a 15,2 m. Isso se deve ao grande adensamento hidrológico na área e às declividades intermediárias, onde diversos rios de menor ordem localizam-se em áreas de interflúvios moderadamente profundas, se forem consideradas as subdivisões do método DRASTIC.

A obtenção do parâmetro R resultou em diferentes valores de recarga para as sub-bacias na área de estudo (Tabela 12), entretanto, o índice atribuído foi alocado uniformemente no índice 9 (conforme Tabela 3 supracitada). O clima da área de estudo é essencialmente tropical, entretanto, o sistema de avaliação DRASTIC foi desenhado em clima temperado, fazendo com que a alta vulnerabilidade atribuída ao parâmetro R possa ser considerada previsível. Não se constitui aqui uma anomalia, tendo-se em vista que o método prevê diferentes intervalos de recarga que contemplam diferentes regiões do mundo. Entretanto, aparenta ser uma oportunidade de melhoria do método DRASTIC quando aplicado em clima tropical, uma vez que a homogeneidade na distribuição espacial da Recarga mostra a baixa sensibilidade deste parâmetro e baixa representatividade dos processos que ocorrem na natureza.

Tabela 12. Recarga calculada das sub-bacias no SJT

Sub-bacia	Recarga (mm/ano)	Índice
Pinheiros	435,11	9
Jacaré-Pepira I	413,65	9
Jacaré-Pepira II	285,17	9
Jacaré-Guaçú I	333,96	9
Jacaré-Guaçú II	285,17	9
Jacaré-Guaçú III	291,18	9
Jacaré-Guaçú IV	360,73	9
Boa Esperança do Sul	269,34	9
São João	293,49	9

O tipo de aquífero é o parâmetro que descreve o principal material constituinte de uma dada unidade litológica. Na área estudada foram predominantes os arenitos e os basaltos. Em linhas gerais, estes materiais possuem alta permeabilidade, entretanto, a presença de porções maciças e ocorrência de intercalações por calcário, lentes sílicas e argilitos nos arenitos proporcionaram variações nos índices atribuídos a cada formação na área do SJT.

O parâmetro I refere-se ao material constituinte do meio físico abaixo do solo agrícola e acima do topo do aquífero, referindo-se, portanto, à zona não saturada do meio físico. Como esta zona resulta do intemperismo das formações geológicas, adotou-se a espacialização da geologia para o seu mapeamento e as classes de vulnerabilidade foram adequadas associando-se o seu principal material constituinte aos índices DRASTIC.

A Condutividade Hidráulica reflete a capacidade de circulação hídrica nos aquíferos, ou seja, refere-se à mobilidade dos fluídos nas diferentes formações geológicas. Embora tenham sido observadas variações nos valores obtidos para cada formação (Tabela 13), a distribuição dos índices foi uniforme por toda a área de estudo sendo igual a 1 (conforme Tabela 8 supracitada). Isso ocorreu porque os valores de condutividade obtidos, referentes ao parâmetro C, foram menores de 4,1 m/dia (CPTI; IPT, 2008) na área estudada.

Tabela 13. Condutividades hidráulicas nas formações geológicas do SJT.

Formação Geológica	Condutividade Hidráulica (m/dia)	Índice
Sedimentos Aluvionares	3,8	1
Coberturas da Serra	1,7	1
Formação Itaqueri	1,7	1
Formação Adamantina	3,7	1
Formação Serra Geral	3,8	1
Formação Botucatu	3,5	1
Formação Piramboia	2,5	1

O parâmetro S mostra as classes de solo presentes na área do Sistema Jacaré-Tietê de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). Na área estudada, observa-se a predominância de Latossolos, que são solos bem desenvolvidos do ponto de vista estrutural, ricos em ferro e têm a característica de serem tipicamente bastante espessos, sendo, portanto, pouco favoráveis à contaminação das águas subterrâneas. Destaca-se aqui que este parâmetro remete exclusivamente ao potencial hídrico de infiltração de um potencial contaminante, excluindo, portanto, quaisquer análises de uso e cobertura do solo na área estudada.

O parâmetro T apresentou um padrão na distribuição espacial das classes de declividade na área de estudo, tendo forte relação com as ordens dos corpos d'água em diferentes zonas da área de estudo. Na porção Sudeste da área de estudo situam-se a maior parte dos corpos d'água superficial de menor ordem, predominando áreas de declividade alta com poucos pontos localizados com declividade baixa. Na região Noroeste predominam os corpos d'água de maior ordem e áreas mais planas (várzeas) com declividades baixas. Este padrão também tem relação com o parâmetro D, pois, de modo geral, onde ocorrem os rios de menor ordem há maior declividade e maior profundidade do NA subterrâneo. Por outro lado, nas zonas de rios de maior ordem ocorrem regiões de várzea com baixa declividade e menores profundidades, resultando em áreas extensas de vulnerabilidade alta.

6.2. Mapas de vulnerabilidade DRASTIC

- Mapa de Vulnerabilidade – DRASTIC Padrão (Figura 14); apresenta a distribuição da vulnerabilidade dos aquíferos no SJT estimada pelo método DRASTIC proposto por Aller et al. (1985; 1987);
- Mapa de Vulnerabilidade – DRASTIC Pesticidas (Figura 15); mostra a distribuição da vulnerabilidade dos aquíferos no SJT estimada pelo método DRASTIC Pesticidas proposto por Aller et al. (1985; 1987);

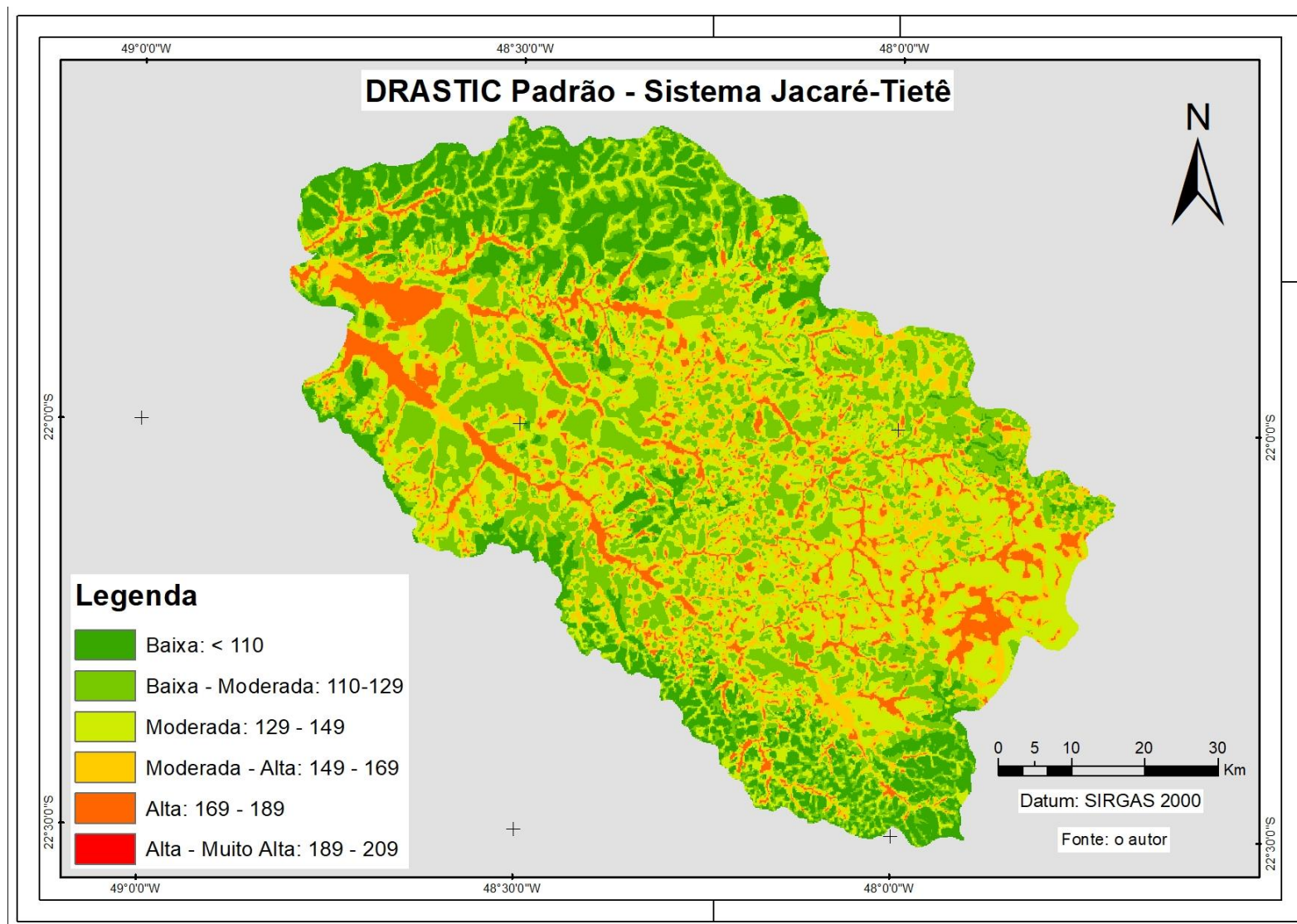


Figura 14. Mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas do SJT – DRASTIC Padrão

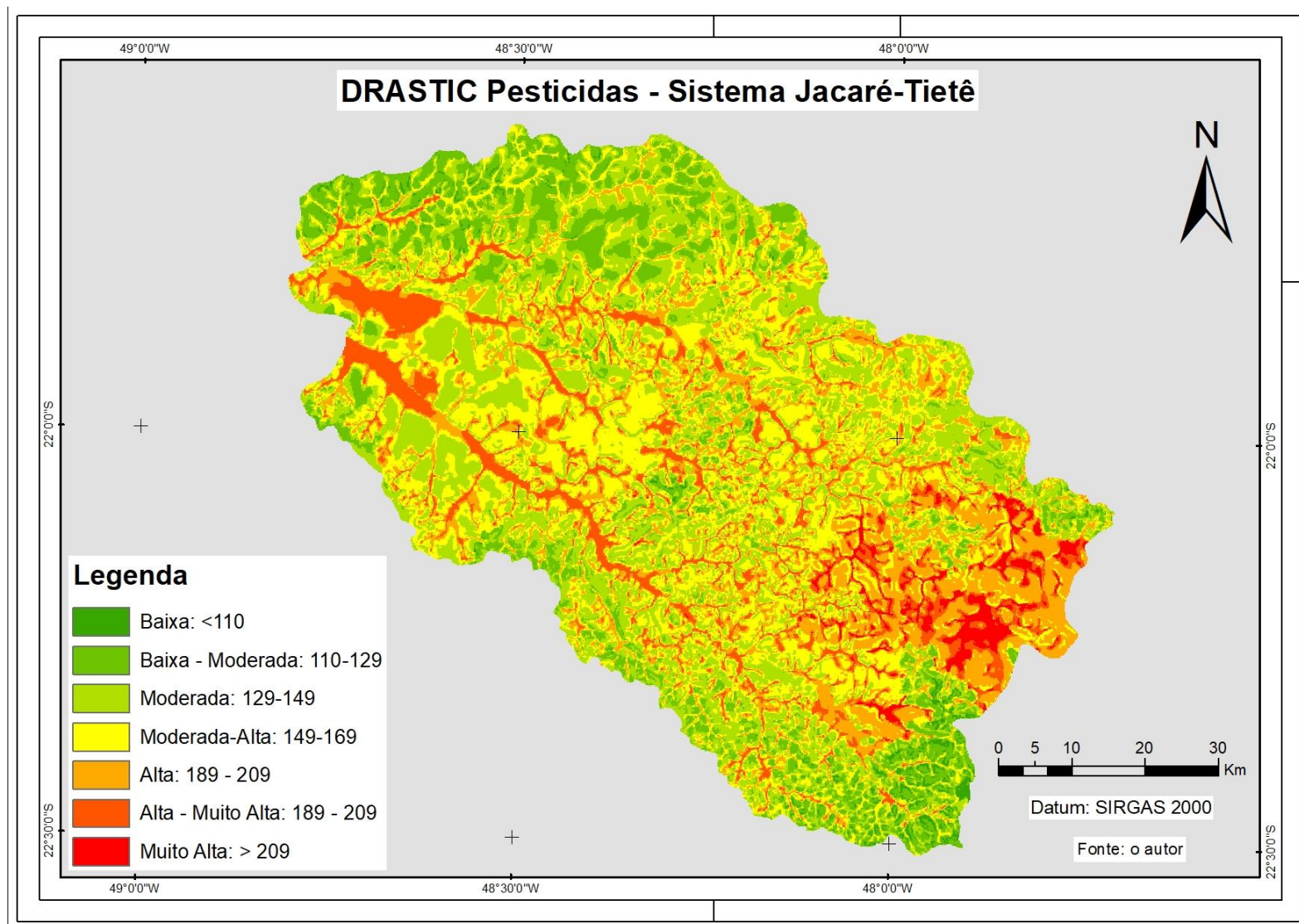


Figura 15. Mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas do SJT – DRASTIC Pesticidas

No presente trabalho foi realizada a avaliação da vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos que ocorrem no Sistema Jacaré-Tietê utilizando-se o método DRASTIC. Como pode-se inferir pelo tamanho da área estudada, a escala de trabalho adotada foi regional, o que não anula a necessidade de trabalhos específicos em escalas locais com nível de detalhamento adequado à avaliação individual de empreendimentos com potencial de contaminação em áreas de vulnerabilidade significativa.

De modo geral, conforme apontado por Ertel; Löbner e Silva (2012), o perigo de contaminação é diretamente proporcional à capacidade de infiltração dos materiais que compõem o meio físico. Stigter; Ribeiro e Dill (2006) e Leite et al. (2011) reforçam que a recarga é um fator importante para o potencial de infiltração de contaminantes solúveis, que podem ser transportados facilmente pela água em fluxo vertical em direção à zona-saturada do aquífero.

Para migrar da superfície do terreno ao lençol freático, o contaminante inicia seu trajeto vertical infiltrando-se no solo. Solos arenosos tendem a ser mais suscetíveis à migração vertical e ao espalhamento de plumas de contaminação, enquanto solos argilosos, devido a sua baixa permeabilidade, tendem a acumular água nas porções mais superficiais de solo, reduzindo a movimentação vertical do contaminante e favorecendo fluxo superficial.

Seguindo um caminho vertical hipotético em direção ao lençol freático, a contaminação primeiramente atinge o solo e a seguir a zona vadosa. As taxas de degradação natural variam de acordo as características do meio e o volume de contaminante, de tal maneira que os contaminantes presentes no processo de infiltração vertical podem ser atenuados naturalmente. No cenário de infiltração hídrica, a água não deixa de recarregar os aquíferos, apenas os contaminantes hipotéticos têm sua mobilidade reduzida ou anulada.

Faz-se necessário também considerar a profundidade do nível d'água subterrânea, que equivale à distância entre a superfície do terreno e o lençol freático. A profundidade do NA pode ser extensa o suficiente para que processos de atenuação natural ocorram e aumentem o tempo de trânsito do contaminante

na zona não-saturada, entretanto, o processo de infiltração da água mantém-se, alterando-se apenas o potencial de mobilidades dos contaminantes dissolvidos.

No momento em que o contaminante hipotético atinge o lençol freático, sua mobilidade varia de acordo com a condutividade hidráulica e com as características do principal material constituinte dos aquíferos. Conforme descrito por Aller et al. (1987), uma vez que o contaminante alcance a zona saturada do aquífero, os caminhos possíveis são: I) seguir a direção e velocidade de fluxo do aquífero; II) seguir o fluxo em menor velocidade; III) flutuar junto ao lençol freático; IV) se acumular no fundo do aquífero e, em casos específicos, V) mover-se em sentido contrário ao fluxo do aquífero. Todavia, os processos relacionados à dinâmica hídrica do contaminante variam de acordo com as configurações, em primeira análise, regionais, e, onde seja adequado, em análises de vulnerabilidade locais.

A avaliação do mapeamento da vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos na área do Sistema Jacaré-Tietê estimada pelo método DRASTIC permite identificar alguns padrões na distribuição espacial da vulnerabilidade em toda a área, tanto para DRASTIC Padrão quanto para DRASTIC Pesticidas. Neste mapeamento foram demarcadas as áreas de maior suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas com as maiores classes de vulnerabilidade, representando, portanto, alta probabilidade de um contaminante inserido na superfície alcançar o lençol freático.

O mapeamento do parâmetro D mostra ser o mais influente na estimativa da vulnerabilidade, o que corrobora com seu peso 5 atribuído pelo sistema DRASTIC. Conceitualmente, há o aumento da vulnerabilidade nas áreas mais próximas aos corpos d'água superficiais devido à diminuição gradual da distância entre a superfície do terreno e o lençol freático, conferindo menor tempo de trânsito e afetando, de modo inversamente proporcional, a probabilidade de um contaminante hipotético atingir o aquífero. Contudo, para além da influência isolada do parâmetro D, é a combinação dos sete parâmetros DRASTIC que resulta na estimativa da vulnerabilidade.

A análise detalhada dos resultados obtidos permitiu constatar que as classes de vulnerabilidade mais altas se concentram na porção central da área de estudo, onde estão localizados os rios tributários integrantes das bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Pepira e Jacaré-Guaçu e estão presentes formações geológicas predominantemente areníticas, onde ocorrem as Formações Piramboa e Botucatu, que caracterizam a área de afloramento do SAG (CPTI; IPT, 2008). Por sua vez, as classes de vulnerabilidade mais baixas concentram-se ao Norte e ao Sul dos rios principais, notadamente pela baixa densidade de corpos d'água, pela declividade relativamente alta e pela configuração geológica nestas regiões, onde ocorrem arenitos com argilitos estratificados da Formação Adamantina ao Norte e arenitos com porcentagem significativa de silte e argila da Formação Itaqueri ao Sul.

Para DRASTIC Padrão, constatou-se a ocorrência de vulnerabilidade Baixa (15,54%), Baixa-Moderada (25,73%), Moderada (34,11%), Moderada-Alta (15,55%), Alta (8,89%) e Alta-Muito Alta (0,18%), não ocorrendo vulnerabilidade Muito Alta e com predominância de vulnerabilidades moderadas, ou seja, no intervalo de 120 a 159 de um total possível de 236.

Devido ao caráter agrícola da área de estudo, também foi estimada a vulnerabilidade utilizando-se DRASTIC Pesticidas. Como a atribuição dos pesos é diferente, verificou-se a ocorrência de vulnerabilidade Baixa (0,72%), Baixa-Moderada (12,24%), Moderada (26,37%), Moderada-Alta (28,70%), Alta (19,71%), Alta-Muito Alta (10,39%) e Muito Alta (1,87%). Nesta condição, permaneceu a predominância da classe de vulnerabilidade Moderada, no intervalo de 120 a 159 de um total de 256, entretanto, deve-se destacar o evidente aumento da presença da classe Alta e a aparição da classe Muito Alta. Destaca-se que o sistema DRASTIC Pesticidas pode representar melhor as condições da área de estudo, pois considera o perfil agrícola da economia local e as interações típicas destes contaminantes com o meio físico.

As diferenças estruturais entre DRASTIC Padrão e DRASTIC Pesticidas resultaram em mapeamentos que contemplaram, respectivamente, as diferentes

interações entre um contaminante com a mobilidade igual a da água e um contaminante com a mesma mobilidade de um pesticida típico. As diferenças de pesos também refletem as fontes de contaminação em cada uma das versões de DRASTIC, pois no caso de DRASTIC Padrão as fontes predominantes são pontuais, como as indústrias, enquanto para DRASTIC Pesticidas, por se tratar de uma análise de uso deste contaminante em área agrícola, as fontes de entrada no meio físico tendem a ser difusas em áreas extensas.

O mapeamento dos parâmetros DRASTIC mostrou diferentes níveis de sensibilidade aos índices pré-definidos por Aller et al. (1985; 1987). Os parâmetros D (Profundidade do nível d'água) e T (Topografia) variaram significativamente em toda a extensão da área estudada, apresentando poucos pontos localizados com intervalos pequenos de profundidade e declividade, respectivamente. Constata-se assim que os parâmetros D e T mostraram-se bastante sensíveis às variações da vulnerabilidade na área de estudo.

Do ponto de vista da vulnerabilidade, o parâmetro R foi constante em toda área estudada. Embora os valores obtidos a partir da decomposição de hidrogramas (OLIVEIRA, 2005) sejam significativos e variem entre si, todos estão alocados no índice mais alto deste parâmetro. Deste modo, o mapeamento do parâmetro R apresentou baixa sensibilidade, estando a Recarga integralmente ponderada em um único índice uniformemente em toda a área de estudo.

Os parâmetros A, I e C foram mapeados em consonância com a distribuição espacial da geologia na área de estudo. Para os parâmetros A e I, esta resolução de trabalho foi a que mais se aproximou da realidade, contemplando especificidades de cada unidade litológica. Todavia, embora seu nível de sensibilidade às variações dos índices seja satisfatório, ainda é menor do que o nível de sensibilidade do parâmetro D, por exemplo. Em contraponto, infere-se sensibilidade baixa no mapeamento do parâmetro C, não sendo incorporadas, portanto, as heterogeneidades entre as formações geológicas na área de estudo.

O parâmetro S foi apresentado na escala 1:500.000, seguindo o mapeamento pedológico de Oliveira e Almeida (2000). Este nível de resolução

mostrou-se compatível com os parâmetros A e I, entretanto, apresenta sensibilidade consideravelmente menor do que os parâmetros D e T, e consideravelmente maior do que os parâmetros R e C. Analisando este parâmetro no contexto do presente trabalho, seu nível de detalhamento e sensibilidade à variação da vulnerabilidade em cada classe mostra-se adequada diante da impossibilidade de realizarem-se trabalhos de campo para fins de caracterização pedológica.

Os parâmetros R e C apresentaram distribuição homogênea em toda a área, alocando-se em apenas um único índice por toda a área de estudo e nas diferentes unidades litológicas. A distribuição espacial homogênea destes dois parâmetros revela problemas importantes no sistema de avaliação da vulnerabilidade.

A Recarga pode ser entendida pela quantidade de água (mm/ano) que efetivamente se infiltra no solo e reabastece os aquíferos (LEITE et al., 2011), entretanto, o sistema atual de mapeamento não considerou as diferentes unidades litológicas no Sistema Jacaré-Tietê. Diante disto, propõe-se o mapeamento da recarga considerando-se as diferentes formações geológicas, utilizando-se, para tanto, os dados do trabalho “Estudo da Recarga do Aquífero Guarani no Sistema Jacaré-Tietê” (RABELO, 2006) apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Recarga das formações geológicas e índices do parâmetro R

Formação	Recarga (mm/ano)	Índice
Botucatu/Pirambaia	465	9
Sedimentos Aluvionares	530	9
Serra Geral	215	8
Adamantina	75	3
Cobertura da Serra	305	9
Itaqueri	45	1

A Condutividade Hidráulica, por sua vez, refere-se ao fluxo hídrico horizontal (m/dia) no aquífero, entretanto, a abordagem de Condutividade Hidráulica no DRASTIC reflete apenas o potencial de movimentação horizontal

(difusão) em um aquífero teoricamente já contaminando, ou seja, em uma situação hipotética o contaminante já teria alcançado o lençol freático.

Como proposta de contribuição para solucionar o problema e aprimorar o sistema de avaliação da vulnerabilidade DRASTIC, substituiu-se o parâmetro C pelo mapeamento da Cobertura do Solo (SMA; CPLA; DIA; CIGI, 2013), objetivando-se contemplar a espacialização do potencial de proteção acima do solo agrícola, observando a capacidade de infiltração proporcionada pelas coberturas presentes na área estudada.

Levando em consideração o trabalho de Ertel, Löbler e Silva (2012), esta alteração objetivou aprimorar o mapeamento e direcionar as discussões acerca das interações no início do trajeto vertical do contaminante, onde há infiltração no solo. Relativamente aos índices, foi realizada a ponderação dos tipos coberturas encontradas na área de estudo, como segue (Tabela 15).

Tabela 15. Índices do parâmetro Cobertura do Solo	
Cobertura do Solo	Índice
Área Construída	1
Cobertura Arbórea	3
Cobertura Herbáceo-Arbustiva	6
Solo Exposto	9
Corpo d'água	10

Para classe de “Área Construída” definiu-se índice igual a 1, por se tratar de áreas impermeabilizadas que, em teoria, não permitem infiltração de água no solo; embora as árvores favoreçam a infiltração de água da chuva por fluxo de tronco, a presença física das árvores nestas áreas é um importante fator de cobertura do solo, assim, para classe “Cobertura Arbórea” o índice foi ponderado igual a 3; a classe “Cobertura Herbáceo-Arbustiva” teve índice igual a 6 e foi considerada uma situação intermediária entre a cobertura arbórea e o solo exposto; as áreas onde se identificou a classe “Solo Exposto” foram definidas como índice igual a 9. Isso se deve à facilidade de infiltração de água nesta condição, acentuada pela

ausência de cobertura do solo; por fim, a classe “corpo d’água” foi pontuada com índice igual a 10 por se tratar de uma contaminação hipotética que já alcançou o corpo hídrico, não cabendo mais a adoção de políticas públicas preventivas, mas de intervenções corretivas.

O sistema de avaliação da vulnerabilidade intrínseca que contemplou as modificações do DRASTIC foi denominado DRASTIC Modificado. Esclarece-se que as modificações propostas não alteraram o caráter do DRASTIC, sobretudo seu viés preventivo e de análise das configurações intrínsecas do meio físico, limitando-se à nova abordagem do parâmetro R e à substituição do parâmetro C pelo parâmetro Cobertura do Solo.

6.3. *Modificações nos parâmetros DRASTIC*

Apresentam-se os resultados das propostas de modificações no sistema de estimativa da vulnerabilidade do método DRASTIC, sendo:

- Mapa do parâmetro R (Recarga) Modificado: se refere à recarga em cada unidade litológica na área de estudo (Figura 16);
- Mapa do parâmetro C (Cobertura do Solo) Modificado: descreve as atividades que cobrem os solos da área de estudo (Figura 17);
- Mapa de Vulnerabilidade – DRASTIC Padrão Modificado: apresenta o mapa de vulnerabilidade no SJT a partir das modificações no método DRASTIC Padrão (Figura 18);
- Mapa de Vulnerabilidade – DRASTIC Pesticidas Modificado: mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos no SJT a partir das modificações no método DRASTIC Pesticidas (Figura 19).

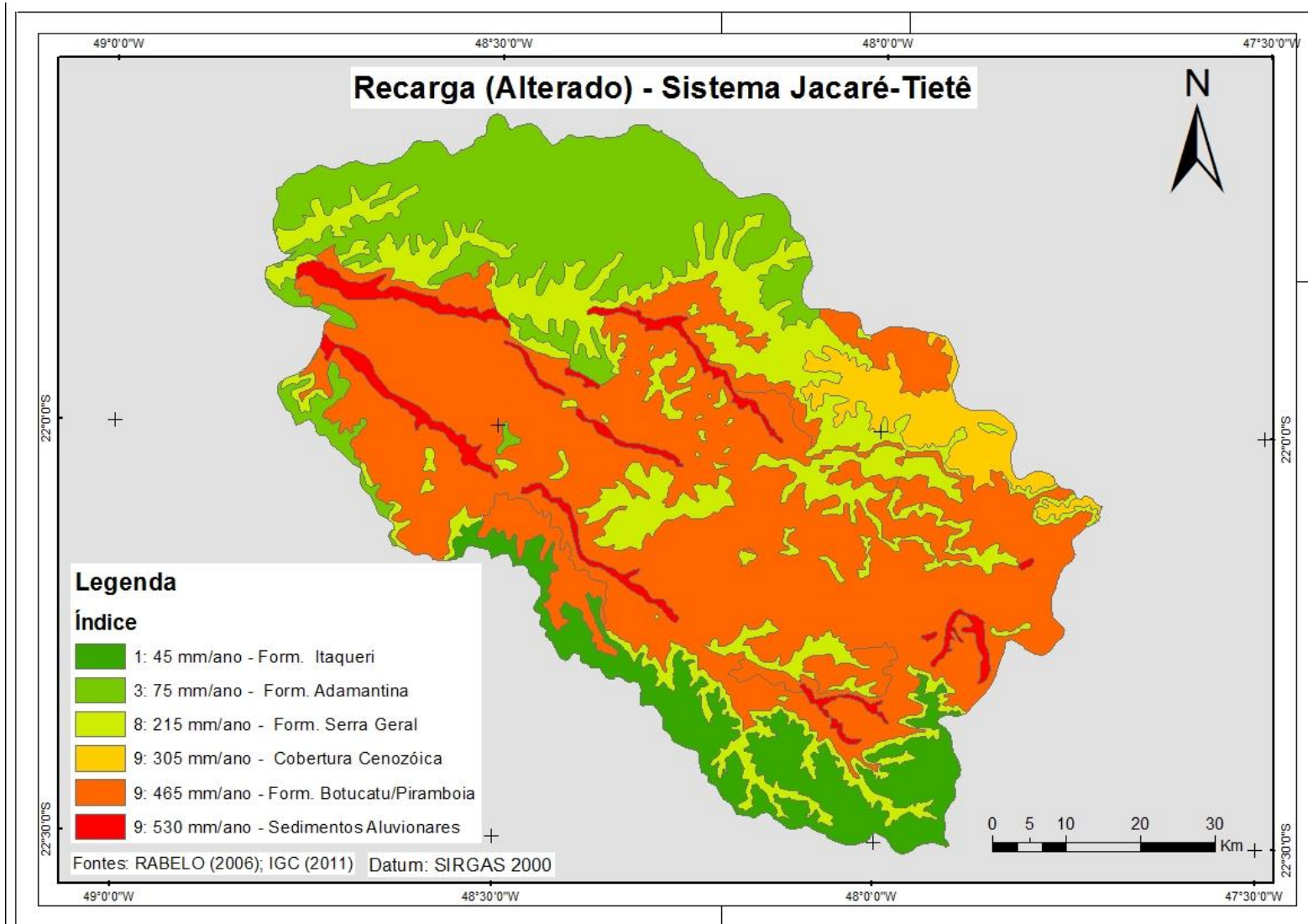


Figura 16. Mapa do parâmetro R Modificado – Recarga relativa a cada unidade litológica na área de estudo

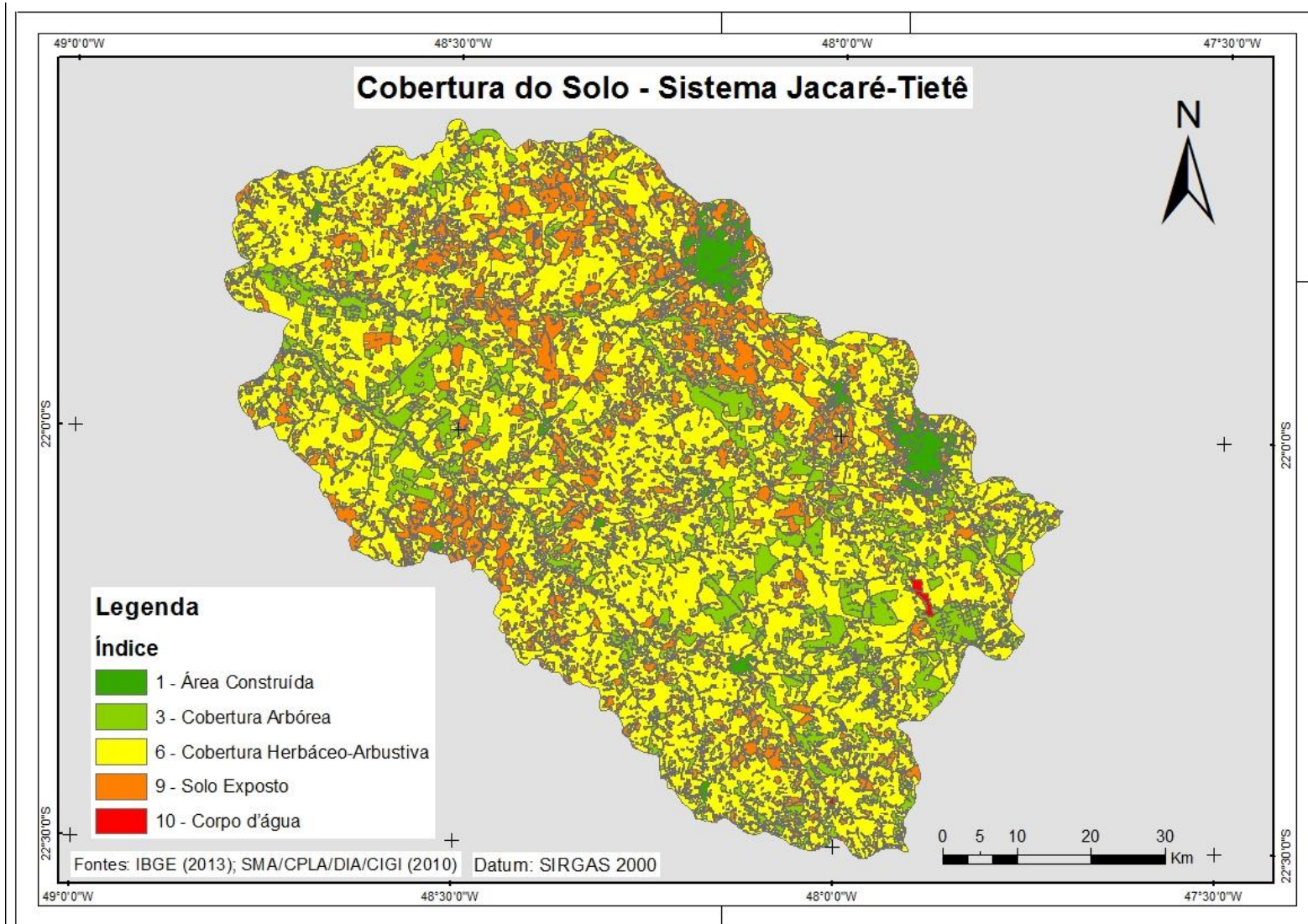


Figura 17. Mapa do parâmetro Cobertura do Solo

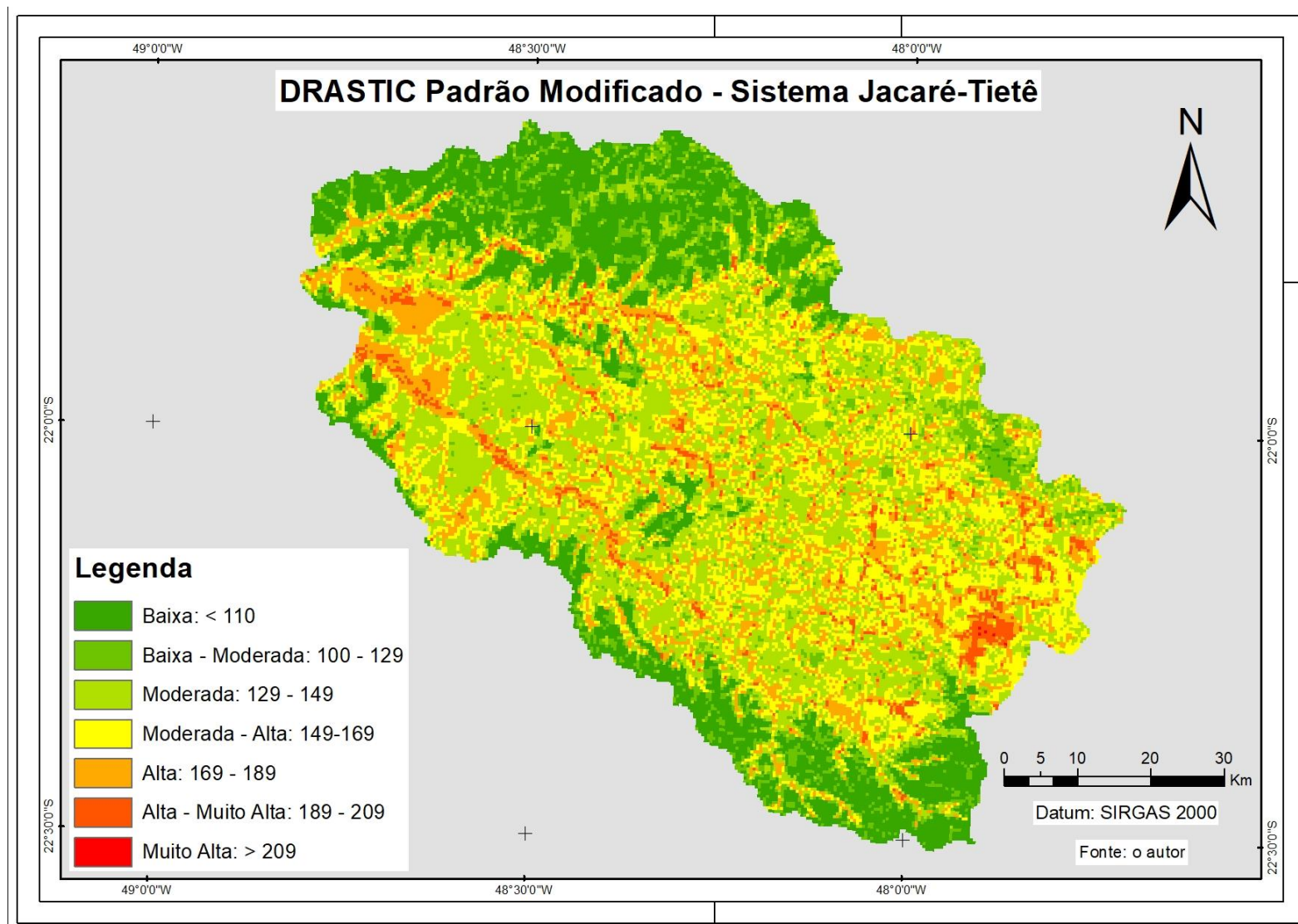


Figura 18. Mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas do SJT – DRASTIC Padrão Modificado

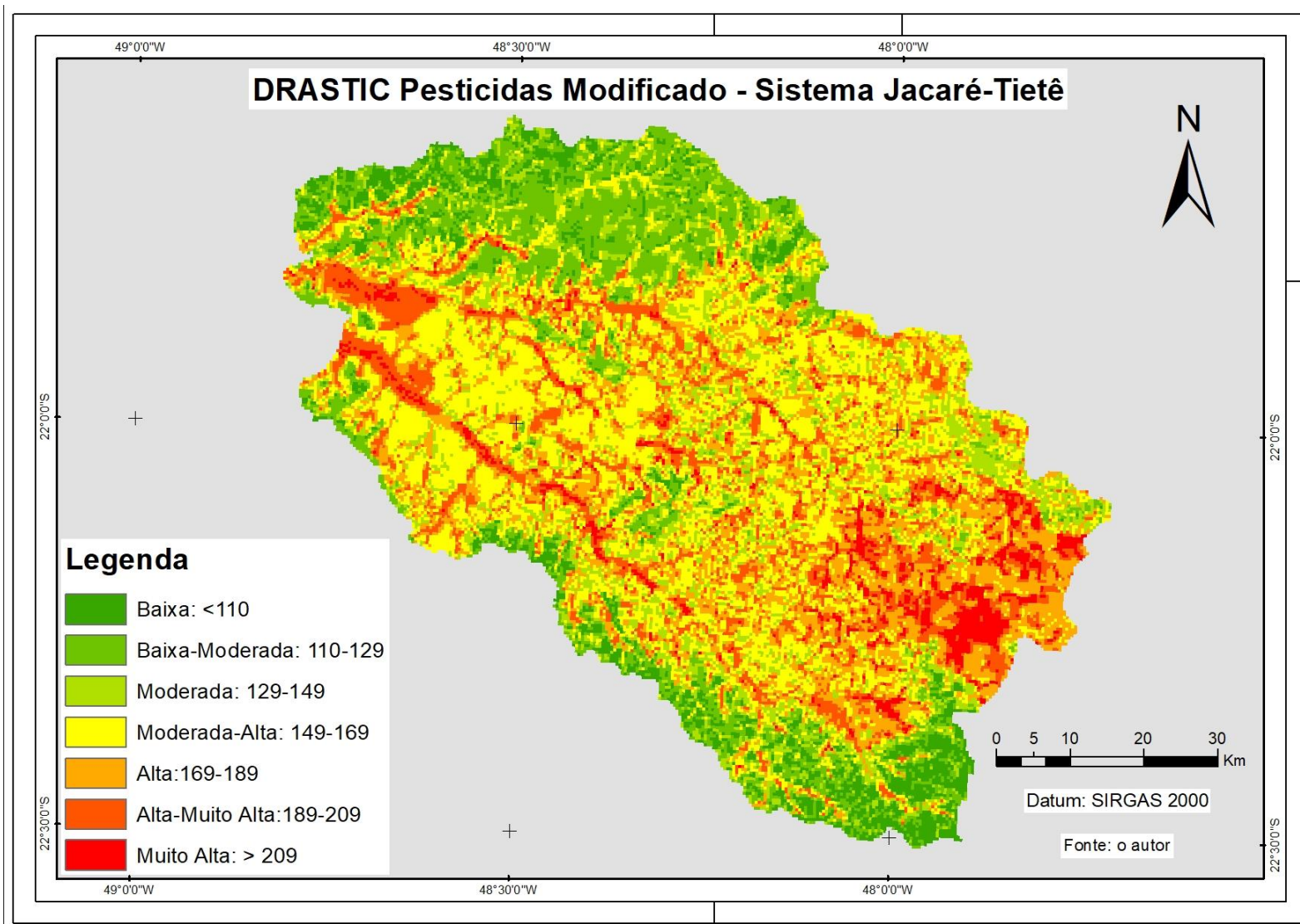


Figura 19. Mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas do SJT – DRASTIC Pesticidas Modificado

Para DRASTIC Padrão Modificado, obteve-se 19,47% de vulnerabilidade baixa, 9,16% de vulnerabilidade baixa-moderada, 29,17% de vulnerabilidade moderada, 23,45% de vulnerabilidade moderada-alta, 15,73% de vulnerabilidade alta, 3,0% de vulnerabilidade alta-muito-alta e 0,02% de vulnerabilidade muito alta. Levando-se em conta as subdivisões baixa-moderada, moderada e moderada-alta, há predominância da classe de vulnerabilidade moderada. Também estão presentes, ainda que sutilmente, as classes de vulnerabilidade alta, muito-alta e alta. Diante disso, pode-se afirmar que este novo sistema de classificação das classes de vulnerabilidade cumpre o papel de identificar as áreas prioritárias para proteção dos aquíferos.

Para DRASTIC Pesticidas Modificado, obteve-se 9,92% de vulnerabilidade baixa, 18,16% de vulnerabilidade baixa-moderada, 18,51% de vulnerabilidade moderada, 3,73% de vulnerabilidade moderada-alta, 26,27% de vulnerabilidade alta, 18,48% de vulnerabilidade alta-muito-alta e 4,93% de vulnerabilidade muito alta. Aqui, as subdivisões baixa-moderada e moderada demonstram a importância das classes de vulnerabilidades moderadas, entretanto, a queda na subdivisão moderada-alta e o significativo aumento nas subdivisões alta e alta-muito alta, demonstram predominância de vulnerabilidade alta se considerados nesta estimativa o caráter agrícola da área de estudo e as modificações propostas nos parâmetros R e C.

As principais diferenças entre o método DRASTIC (ALLER, 1985; 1987) e o método DRASTIC Modificado ocorreram em função das modificações realizadas nos parâmetros R e C. No DRASTIC (ALLER, 1985; 1987), a Recarga apresentou dados distribuídos homogeneamente nos índices máximos, enquanto que a Condutividade Hidráulica apresentou dados alocados homogeneamente nos índices mínimos. A partir das modificações realizadas, os dados de Recarga se redistribuíram de acordo com as unidades litológicas, ao passo que os dados de Condutividade Hidráulica foram redistribuídos de acordo com a Cobertura do Solo.

Neste processo, os índices atribuídos ao parâmetro Recarga se subdividiram entre os maiores e os menores índices, desfazendo a

homogeneidade anteriormente apresentada. Relativamente à Cobertura do Solo, embora as áreas de cobertura do solo arbórea tenham sido ponderadas com índices baixos, as áreas com solo exposto receberam altos índices, resultando no aumento dos índices atribuídos em relação ao parâmetro C.

Após as ponderações finais, o resultado das modificações realizadas é o observado no mapa DRASTIC Modificado (Padrão e Pesticidas). A seguir apresenta-se a variação da vulnerabilidade comparando-se os métodos DRASTIC (ALLER, 1985; 1987) e DRASTIC Modificado (Tabela 16).

Tabela 16. Variação das classes de vulnerabilidade

Classes	DRASTIC PADRÃO (ALLER, 1985)	DRASTIC PADRÃO Modificado	Variação	DRASTIC PESTICIDA (ALLER, 1985)	DRASTIC PESTICIDAS Modificado	Variação
Baixa	15,54%	19,47%	3,93%	0,72%	9,92%	9,20%
Baixa-Moderada	25,73%	9,16%	-16,57%	12,24%	18,16%	5,92%
Moderada	34,11%	29,17%	-4,94%	26,37%	18,51%	-7,86%
Moderada-Alta	15,55%	23,45%	7,90%	28,70%	3,73%	-24,97%
Alta	8,89%	15,73%	6,84%	19,71%	26,27%	6,56%
Alta-Muito-Alta	0,18%	3,0%	2,82%	10,39%	18,48%	8,09%
Muito Alta	0,0%	0,02%	0,02%	1,87%	4,93%	3,06%

As modificações realizadas nos parâmetros R e C do método DRASTIC (ALLER, 1985; 1987) alteraram a predominância das classes de vulnerabilidade. Para DRASTIC Padrão, observou-se a maior queda na classe baixa-moderada igual a 16,57%, seguida por queda de 4,94% na classe moderada. Embora tenha ocorrido um aumento de 3,93% na classe baixa, as quedas foram redistribuídas predominantemente em aumentos nas classes mais altas de vulnerabilidade, resultando em aumento de 7,90% na classe moderada-alta; 6,84% na classe alta; 2,82% na classe alta-muito-alta e o aumento pouco significativo de 0,02% na classe muito alta.

Para DRASTIC Pesticidas, observou-se uma queda bastante expressiva na classe moderada-alta igual a 24,97%, seguida por queda de 7,86% na classe moderada. Diferentemente de DRASTIC Padrão, a vulnerabilidade foi redistribuída para as classes mais baixas e mais altas, embora se deva destacar que houve aumento mais significativo nas classes mais altas quando comparadas às mais baixas. Obteve-se, portanto, aumento de 9,20% na classe baixa; 5,92% na classe baixa-moderada; 6,56% na classe alta; 8,09% na classe alta-muito-alta e 3,06% na classe muito alta.

Esta análise permite inferir que a versão Modificada do método DRASTIC Pesticidas, proposta no presente trabalho, mostra-se mais adequada para a estimativa da vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas na área do Sistema Jacaré-Tietê. Esta é a única versão de DRASTIC que contempla o caráter agrícola da área de estudo, considerando as interações de um pesticida típico com o meio físico. Nesta versão os parâmetros possuem sensibilidade adequada às variações presentes na área de estudo, apresentando variações nos índices de todos os parâmetros. Por fim, as três classes de vulnerabilidade incorporadas ao mapeamento da vulnerabilidade cumpriram o objetivo de destacar as áreas prioritárias para ações de políticas públicas para proteção dos recursos hídricos.

Não obstante ao aumento da vulnerabilidade inerente ao DRASTIC Modificado na área do Sistema Jacaré-Tietê, o padrão de distribuição espacial da vulnerabilidade mantém-se semelhante, porém com maior detalhamento, quando comparados os mapas DRASTIC (Padrão e Pesticidas) e DRASTIC Modificado (Padrão e Pesticidas). Sendo assim, as classes mais altas de vulnerabilidade seguem concentradas na zona central do SJT e as classes mais baixas continuam em dois setores ao Norte e ao Sul dos rios Jacaré-Pepira e Jacaré-Guaçú. Este padrão mostra que embora as modificações realizadas sejam importantes para conferir maior sensibilidade espacial aos parâmetros trabalhados, o sistema DRASTIC mantém sua estrutura básica, não resultando, portanto, em prejuízos à sua aplicabilidade, mas sim aprimoramentos e melhorias necessários ao método.

7. CONCLUSÕES

O mapeamento da vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas do Sistema Jacaré-Tietê foi realizado conforme o método DRASTIC proposto por Aller et al. (1985; 1987), nas versões Padrão e Pesticidas.

Os resultados obtidos a partir do método DRASTIC (ALLER et al., 1985 1987) mostraram a necessidade de modificações nos parâmetros R e C, com objetivo de aumentar sua sensibilidade quanto à distribuição de seus índices na área de estudo.

Diante disto, o parâmetro R passou a ser delimitado pelas unidades litológicas e o parâmetro C foi substituído pelo parâmetro Cobertura do Solo. Além disso, foram adicionadas três classes ao mapeamento final da vulnerabilidade DRASTIC.

O mapeamento da vulnerabilidade a partir do método DRASTIC Modificado possibilitou observar que as modificações propostas resultaram em melhorias nos critérios de ponderação dos índices e na sensibilidade dos parâmetros R e C.

A modificação das classes no mapeamento da vulnerabilidade contribuiu para a delimitação de áreas prioritárias ao direcionamento de políticas públicas para conservação de recursos hídricos.

O método DRASTIC Pesticidas Modificado apresentou um mapeamento da vulnerabilidade intrínseca com modificações nos parâmetros R e C, modificações nas classes de vulnerabilidade e considera o perfil agrícola do Sistema Jacaré-Tietê. Conclui-se, portanto que o método DRASTIC Pesticidas Modificado se mostrou mais adequado para estimativa da vulnerabilidade intrínseca na área do Sistema Jacaré-Tietê.

Por fim, recomenda-se que este mapeamento seja utilizado para subsídio técnico e científico na elaboração e aplicação de políticas públicas para regramento do uso e cobertura do solo em áreas onde exista interesse em proteger os recursos hídricos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL HALLAQ, A. H.; ELAISH, B. S. A. **Assessment of aquifer vulnerability to contamination in Khanyounis Governorate, Gaza Strip—Palestine, using the DRASTIC model within GIS environment.** Arabian Journal of Geosciences, v. 5, n. 4, p. 833-847, 2012.
- ALBINET, M.; MARGAT, J. **Cartographie de la vulnérabilité a la pollution des nappes d'eau souterraine.** Bull BRGM 2me Series: v.3, n.4, p.13-22. 1970.
- ALBUQUERQUE FILHO, J. L. et al. **Diretrizes para o desenvolvimento e proteção ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no estado de São Paulo, Brasil.** Boletín Geológico y Minero, v.123, n.3, p. 353-366. 2012.
- ALLER, L. et al. **DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic setting.** USEPA Report 600/02-85/018. United States Environmental Protection Agency (USEPA) Environmental Research Laboratory; Ada, Oklahoma. 1985.
- ALLER, L. et al. **DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic setting.** USEPA Report 600/02-87/035. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Environmental Research Laboratory; Ada, Oklahoma. 1987.
- ANDERSEN, L. J.; GOSK, E. **Applicability of vulnerability maps.** Environmental Geology 13.1. p. 39-43. 1989.
- ANTONAKOS, A.K., LAMBRAKIS, N.J. **Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece.** Journal of Hydrology 333, p. 288–304. 2007.
- AUGE, M. **Vulnerabilidade de aquíferos.** Revista Latino-Americana de Hidrogeologia, v. 4, p. 85-103, 2004.
- BACHMAT Y.; COLLIN M. **Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution.** In: Van Duijvenbooden W, Van Waegeningh HG. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Proceedings and Information no. 38, TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, pp 297–307. 1987.
- CANTER, L. W. **Nitrates in groundwater from agriculture practices—causes, prevention and clean-up.** July. Report to United Nations Development Program, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, 1987.
- CARVALHO, G. J. P. **Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na bacia hidrográfica do Rio Sordo: comparação de modelos baseados no método DRASTIC.**

Caderno de Geografia nº32. Coimbra, Faculdade de Letras. Universidade de Coimbra – pp.289-299. 2013.

CHACHADI A. G.; LOBO-FERREIRA, J. P. **Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method.** Proc. Workshop on modelling in hydrogeology, Anna University, Chennai, pp.143-156, in: COASTIN. A Coastal Policy Research Newsletter, Number 4, March 2001. New Delhi, TERI, p. 7-9. 2001.

CHRISTOFIDIS, D. **Água, ética, segurança alimentar e sustentabilidade ambiental.** Bahia: Análise & Dados Salvador, v. 13, n. especial, p. 371-382. 2003.

CIVITA, M. et al. **Carta da vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi delle Alpi Apuane.** Mem. explic, Monografia GNDCl. - CNR. N 399, Firenze, 56 pp. 1990.

CIVITA, M.; MAIO, M.D. **Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination:** Italian "Combined" Approach. Geofísica internacional, 43 (4), p. 513-532. 2004.

COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICAS TIETÊ-JACARÉ (CBHTJ). **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da UGRHI 13.** 2016. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents//CBH-TJ/11832/2016-12-12-relatorio-situacao-ugrhi13.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2017.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. [Site]. **A Importância das Águas Subterrâneas.** 2014. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/Informa??es-B?sicas/3-Polui??o-das-?guas-Subterr?neas>. Acesso em: 25 abr. 2017a.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. [Site]. **A Poluição das Águas Subterrâneas.** 2014. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/Informa??es-B?sicas/3-Polui??o-das-?guas-Subterr?neas>. Acesso em: 25 abr. 2017b.

COOPERATIVA DE SERVIÇOS, PESQUISAS TECNOLÓGICAS E INDUSTRIAIS (CPTI); INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Revisão do Plano de Bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Tietê/Jacaré (UGRHI 13).** Relatório Técnico Nº 402. 228 p. 2008.

CORRÊA, U. M. P. **Estudo das Águas Subterrâneas das Bacias Hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira no Estado de São Paulo.** Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Universidade de São Paulo; São Carlos. 1995.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE/SERH); INSTITUTO GEOLÓGICO (IG/SMA); INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT/SP); SERVIÇO

- GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Escala 1:100.000.** São Paulo, Conselho Estadual de Recursos Hídricos, 2005.
- DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURAIS DE MICHIGAN (MICHIGAN DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES). **Site assessment system (SAS) for the Michigan priority ranking system under the Michigan Environmental Response Act;** Michigan Department of Natural Resources, 91 pp. 1983.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBICS.** Brasília/DF - Brasil. EMBRAPA Solos. 2ª ed., 286 p. 2006.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **ArcGIS 10.1.** Redlands, Califórnia, EUA. 2012.
- ERTEL T.; LÖBLER, C.A.; SILVA, J.L.S. **Índice de vulnerabilidade das águas subterrâneas no município de Rosário do Sul, Rio Grande do Sul.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental v. 7, n. 7, p. 1400-1408, 2012.
- FENN D. et al. **Use of the water balance method for predicting leachate generation from solid waste disposal sites.** U.S. EPA Solid Waste Report no. 168 t Cincinnati t Ohio t 40 pp. 1975.
- FIJANI, E. et al. **Optimization of DRASTIC method by supervised committee machine artificial intelligence to assess groundwater vulnerability for Maragheh–Bonab plain aquifer, Iran.** Journal of Hydrology p. 89–100. 2013.
- FOSTER S. S. D. **Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy.** In: Van Duijvenbooden W, Van Waegeningh HG. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Proceedings and Information. n. 38, Committee on Hydrological Research, The Hague, p. 69–86. 1987.
- FOSTER, et al. **Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies.** World Bank, GWMATE. Washington, 101 p, 2002.
- FOSTER, S. S. D. et al. **Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities and Environment Agencies.** The International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank. 2006.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data.** CEPIS Tech. Report. Lima, Peru. 1988.

- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R.; ANDREO, B. **The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection?**.Hydrogeology Journal. v. 21, p. 1389–1392. 2013.
- GIBB et al. **Hazardous waste in Ogle and Winnebago Counties: potential risk via ground water due to past and present activities**. Illinois Department of Energy and Natural Resources, Document no. 83/26, 66 pp. 1983.
- GUIGUER, N.; KOHNKE, M. W. **Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos**.Revista Águas Subterrâneas. n. 1, 2002.
- HAERTLE, T. **Method of working and employment of EDP during the preparation of groundwater vulnerability maps**. Ground Water in Water Resources Planning IAHS Publication, n. 142, 1983.
- HAMZA, S. M. et al. **Accomplishment and subjectivity of GIS-based DRASTIC groundwater vulnerability assessment method: a review**. Environmental Earth Sciences, v. 73, n. 7, p. 3063-3076, 2015.
- HIRATA, R. C. A. **Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas**. 1994. Estudo de casos no estado de São Paulo. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo (USP). 1994.
- HUTCHINSON W. R.; HOFFMAN J. L. **A ground water pollution priority system**; New Jersey Geological Surveyt Open-file Report no. 83-4. Trenton t New Jerseyt 32 pp. 1983.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Base de Dados 1:250.000**. 2014. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br/>. Acesso em: 20 jul. 2016.
- INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA (IEA). **Previsões e Estimativas das Safras Agrícolas do Estado de São Paulo, Ano Agrícola 2016/17**. 2017. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=14311>>. Acesso em: 30 mar. 2017.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. Escala: 1:1000000**. São Paulo: IPT, 1981.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (IGC-SP). **Mapa Limite de UGRHI**. 2011. Gerência de Cartografia. Tipo de representação: Vetor. Escala 1:100000. Disponível em: <<http://datageo.ambiente.sp.gov.br/app/?ctx=DATAGEO>>. Acesso em: 05 out. 2016
- INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (IGC-SP). **Mapa Municipal de SP**. 2015. Gerência de Cartografia. Tipo de representação: Vetor. Escala 1:50000. Disponível em: <<http://datageo.ambiente.sp.gov.br/app/?ctx=DATAGEO>>. Acesso em: 05 out. 2016.

- PEREIRA JÚNIOR, L. C. P.; SOARES, H. L. T.; DE CASTRO, S. S. **Vulnerabilidade natural e risco de contaminação do Aquífero Bauru no município de Rio Verde–GO.** Águas Subterrâneas, v. 29, n. 2, p. 129-145, 2015.
- KAYANE, I. **Some problems relating to groundwater balance.** Hydrological Sciences Journal, v. 28, n. 1, p. 125-137, 1983
- KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra.** México: Fundo de Cultura Econômica. 474 p. 1948.
- LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (LNEC). **Cartografia da Vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas do concelho de Montemor-o-Novo utilizando o método DRASTIC.** LNEC, Departamento de Hidráulica, Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas, Lisboa, Proc.607/1/14252. 2002.
- LEGRAND, H. **System for evaluating contamination potential of some waste sites.** American Water Work Association Journal. v. 56, n. 8, p. 959-974. 1964.
- LEGRAND, H.E. **A standardized system for evaluating waste disposal sites.** NWWA, Worthington, OH: 49 p. 1983.
- LEGRAND, H.E. **Comparative hydrogeology:** Na example of its use. Geological Society of America Bulletin. n. 81, p. 1243-1248. 1970.
- LEGRAND, H.E. **Pattern of contaminated zones of water in the ground.** Water Resouces Research 1, nº 1, p. 83-95. 1965.
- LEITE, C. B. B. et al. **Avaliação da Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas na Bacia Hidrográfica Tietê/Jacaré – UGRHI-13.**VII Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SILUSBA). 2011.
- LIBOS, M. I. P. C. **Modelagem da Poluição não-pontual na Bacia do Rio Cuiabá.** 2003. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. 2003.
- LIGGETT, J. E.; ALLEN, D. M. **Comparing approaches for modeling spatially distributed direct recharge in a semi-arid region (Okanagan Basin, Canada).** Hydrogeology journal, v. 18, n. 2, p. 339-357, 2010.
- LIMA, E. B. N. R. **Modelagem Integrada para Gestão da Qualidade da Água na Bacia do Rio Cuiabá.** 2001. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. 2001.
- LOBO-FERREIRA, J.P.; CABRAL, M. **Proposal for an operational definition of vulnerability for the European Community's Atlas of Groundwater Resources.** In: framework of the Meeting of the European Institute for Water, Groundwater Work Group Brussels. 1991.

- LOBO-FERREIRA, J.P.C. **Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e protecção dos aquíferos de Portugal**. 4º Congresso da Água, Lisboa. 1998.
- LOURENCETTI, C. et al. **Contaminação de Águas Subterrâneas por pesticidas: avaliação preliminar**. Centro Universitário de Araraquara. Departamento de Química. 2006.
- MARGAT, J. **Ground water vulnerability to contamination**. Bases de al cartographie. Orleans, France. 1968.
- MENEZES, J. P. C. et al. **Qualidade da água subterrânea para consumo humano e uso agrícola no sul do estado do Espírito Santo**. Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET), v. 17, n. 17, p. 3318-3326, 2014.
- MOTA PAIS, M. F. A.; ANTUNES, I. M. H. R.; ALBUQUERQUE, M. T. D. **Vulnerabilidade do sistema aquífero na captação da Fadagosa de Nisa (Alentejo, Portugal): aplicação do índice DRASTIC**. I Congresso Internacional “GeoCiências na CPLP”. Universidade de Coimbra. Portugal. 2012.
- OLIVEIRA, M. M. et al. **Estudos sobre a disponibilidade e vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos da Região Metropolitana do Recife (Brasil)**. XIII Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SILUSBA). 2017.
- OLIVEIRA H. P.; ALMEIDA, C. L. F. **Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo 1:50000**. Campinas, Instituto Agrônomo, 2000.
- OLIVEIRA M. M. **Estimativa da recarga de águas subterrâneas a partir da análise dos hidrogramas de escoamento superficial na área abrangida pela folha 6 da Carta Hidrogeológica de Portugal à escala 1: 200.000**. VII Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SILUSBA). Évora, Portugal. 2005.
- OLIVEIRA, D. C. **Modelos de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos**. Monografia (TCC). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 41 f. 2013.
- OLIVEIRA, M. M.; MOINANTE, M. J.; LOBO-FERREIRA, J. P. **Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com Base na Aplicação do Método DRASTIC**. Relatório Final 60/97 GIAS, Lisboa, LNEC. 532 pp. 1997.
- PARALTA, E. A., FRANCES, A. P.; RIBEIRO, L. F. **Avaliação da vulnerabilidade do sistema aquífero dos Grabos de Beja e análise crítica das redes de monitorização no contexto da directiva da água**. VII Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SILUSBA). Évora. 2005.

- PERINOTTO, J. A. J.; LINO, I. C. **Bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí: Geologia, Recursos Minerais e Passivos Ambientais**. In: Magda Adelaide Lombardo. (Org.). *Cenário em Ação: Paisagem do Rio Corumbataí-SP*. 1ed. Rio Claro: IGCE/Unesp, v. 1, p. 70-96. 2007.
- RABELO, J. L. **Estudo da recarga do Aquífero Guarani no sistema Jacaré-Tietê**. 2006. 200 p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. 2006.
- SABIK, H.; JEANNOT, R.; RONDEAU, B. **Multiresidue methods using solid-phase extraction techniques for monitoring priority pesticides, including triazines and degradation products, in ground and surface waters**. *Journal of chromatography*. v. 885, n. 1-2, p. 217-236, 2000.
- SAMAKE, M. et al. **Groundwater Vulnerability Assessment in Shallow Aquifer in Linfen Basin, Shanxi Province, China Using DRASTIC Model**. *Journal of Sustainable Development*, v. 4. n.1. 2011.
- SANTOS, R. G. et al. **GIS Applied to the Mapping of Land Use, Land Cover and Vulnerability in the Outcrop Zone of the Guarani Aquifer System**. *Procedia Earth and Planetary Science*, v. 15, p. 553-559, 2015.
- SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE (SMA); COORDENADORIA DE PLANEJAMENTO AMBIENTAL (CPLA); DEPARTAMENTO DE INFORMAÇÕES AMBIENTAIS (DIA); CENTRO DE INTEGRAÇÃO E GERENCIAMENTO DE INFORMAÇÕES (CIGI). **Cobertura da Terra do Estado de São Paulo**. 2013. Serviço Geográfico. Tipo de representação: Vetor. Disponível em: <<http://datageo.ambiente.sp.gov.br/app/?ctx=DATAGEO>>. Acesso em: 05 out. 2017.
- SELLER, L. E.; CANTER L. W. **Summary of selected ground-water quality impact assessment methods**. National Center For Ground Water Research Report no. NCGWR 803, Norman, Oklahoma, 142 pp. 1980.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:750.000 – 2005.
- SHRESTHA, S.; SEMKUYU, D.J.; PANDEY, V. P. **Assessment of groundwater vulnerability and risk to pollution in Kathmandu Valley, Nepal**. *Science of the Total Environment*, 556, p. 23–35. 2016.
- SILVA, R. C. A.; ARAUJO, T. M. **Qualidade da água do manancial subterrâneo em áreas urbanas de Feira de Santana - Bahia**. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 8 n. 4, p. 1019-1028. 2003.
- SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (SIAGAS); SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Dados de poços de monitoramento da água subterrânea**. 2017.

Disponível em: http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php. Acesso em 07 jul. 2017.

- SOARES, D. F.; FARIA, A. M.; ROSA, A. H. **Análise de risco de contaminação de águas subterrâneas por resíduos de agrotóxicos no município de Campo Novo do Parecis (MT), Brasil.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 22, n. 2, 2017.
- SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B. **Cenozoic Deposits in South Central Brazil.** Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 47, p. 343-351, 1975.
- STIGTER, T. Y.; RIBEIRO, L.; DILL, A. M. M. C. **Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal.** Hydrogeology Journal, v. 14, n. 1-2, p. 79-99, 2006.
- TALTASSE, P. **Mapas da vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP).** Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. Ed. 1. 1972.
- THORNTON, S.W.; MATHER J.R. **Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance.** Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, Centerton, New Jersey, vol. 10, no. 3, 311 pp. 1957.
- TUCCI, C. E. M. et al. **Cenários da Gestão da Água no Brasil: Uma Contribuição para a Visão Mundial da Água.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 5, n. 3, 31-43. Set. 2000.
- TUNDISI, J. G. et al. **A bacia hidrográfica do Tietê/Jacaré: estudo de caso em pesquisa e gerenciamento.** Revista Estudos Avançados. Brasil. 2008.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA – AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DOS ESTADOS UNIDOS) [Site]. **What is a Pesticide?** 2016. Disponível em: < <http://www.epa.gov/pesticides/about/index.htm>>. Acesso em: 15 out. 2016.
- VAN STEMPVOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. **AVI: A method for groundwater protection mapping in the prairie provinces of Canadá.** PPWD. Pilot Project. Set-1991-mach 1992, Groundwater and Contaminants Project. Environmental Sciences, Division, National Hydrology Research Institute, 1992.
- VRBA J.; ZAPOROZEC A. **Guidebook on mapping groundwater vulnerability.** vol 16. In: International contributions to hydrogeology, Heise, Hannover, Germany, 131 p. 1994.